



Sveučilište u Zagrebu  
Grafički fakultet

**IVANA ČIRJAK**

**ANALIZA DIMENZIONALNE  
STABILNOSTI PAPIRA PRIMJENOM  
HOLOGRAFSKE INTERFEROMETRIJE**

**DIPLOMSKI RAD**

Mentor:  
doc.dr.sc, Damir Modrić

Student:  
Ivana Čirjak

Zagreb, 2014

## SAŽETAK

Dimenzionalna stabilnost papira važan je parametar pri kontroli kvalitete grafičkih proizvoda. S obzirom da je papir u svom većinskom sastavu celuloza, on u kontaktu s vodom upija u sebe vlagu te bubri. Bubrenjem dolazi do povećanja celuloznih vlakana u papiru te se njegova dimenzija poveća za neki iznos. Na tu pojavu mora se računati pri otiskivanju grafičkih proizvoda u tehnici ofsetnog tiska jer tehnika zahtjeva kontakt tiskovne podloge sa otopinom za vlaženje. Papir se poveća za vrijeme prolaska kroz stroj te time uzrokuje pomak u naližanju jedne separacije na drugu. Zbog toga je potrebno tiskovne podloge na kojima će se vršiti otiskivanje prethodno testirati i buduću nastalu promjenu uzeti u obzir prilikom izrade tiskovnih formi. U ovom radu mjeri se dimenzionalna promjena na tri vrste papira vlažena trima različitim otopinama za vlaženje. Istraživanje se provodi metodom holografske interferometrije koja izrazito precizno može definirati svaku nastalu promjenu na površini papira. Metoda je neinvazivna te se mjerenja mogu ponavljati neograničeno, bez da se rezultati jednog mjerenja upliću u rezultate drugog mjerenja.

**KLJUČNE RIJEČI:** dimenzionalna stabilnost, otopina za vlaženje, holografska interferometrija, interferogram

## **ABSTRACT**

Dimensional stability is important quality control parameter of printed products. Since cellulose is main paper ingredient, it absorbs the moisture and becomes liable to blistering, if it comes in contact with moisture. Moisture causes cellulose fibers to grow bigger and the paper changes its dimension. When it comes to offset printing, it is important to know how much dimensions of paper change in contact with fountain solution. That change is happening within printing machine, in between printing units, and causes shift in overlapping of color separations. That is why it is important to know how the paper behaves in moist area before we even start the printing proces. In this master thesis I am observing the change in dimensions of three types of paper moistured with three different fountain solutions. The research is managed using holographic interferometry, which can very precisely note even the smallest change on paper surface. Holographic interferometry is non-destructive method where measurement can be repeated indefinitely without interference of the results.

**KEY WORDS:** dimensional stability, fountain solution, holographic interferometry, interferogram

# SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. SVOJSTVA PAPIRA .....	2
2.1. Dimenzionalna stabilnost papira .....	2
2.1.1. PIRA PET uređaj za mjernje vlage u papiru .....	3
3. OSNOVNE KARAKTERISTIKE OFSETNOG TISKA .....	5
3.1. Definiranje kvalitete otopine za vlaženje .....	5
4. INTERFERENCIJA VALOVA SVJETLOSTI.....	8
4.1. Youngov eksperiment .....	8
4.1.1. Intenzitet pruga interferencije.....	12
5. INTERFEROMETRIJA .....	14
5.1. Michelsonov interferometar.....	14
5.2. Mach-Zehnderov interferometar .....	17
6. HOLOGRAFSKA INTERFEROMETRIJA.....	19
6.1. Hologram .....	19
6.2. Alati potrebni za snimanje holograma.....	19
6.2.1. Laser .....	19
6.2.2. Djelitelj snopa.....	21
6.2.3. Zrcala .....	22
6.2.4. Divergentne leće .....	23
6.3. Snimanje i rekonstrukcija holograma .....	23
6.4. Digitalna holografška interferometrija .....	26
7. EKSPERIMENTALNI DIO .....	27
7.1. Cilj istraživanja .....	27
7.2 Materijali i metode istraživanja .....	28
7.2.1. Optički stol.....	29
7.2.2. Laser .....	30
7.2.3. Djelitelj snopa.....	30
7.2.4. CCD kamera .....	31
7.3. Opis mjerenja .....	33
8. REZULTATI I RASPRAVA .....	40
8.1. Matematički model za izračunavanje promjene dimenzije papira na temelju navedenog istraživanja .....	50
9. ZAKLJUČAK.....	55
Literatura .....	56

# 1. UVOD

U ovom diplomskom radu pokušava se objasniti problematika dimenzionalne stabilnosti papira kao tiskovne podloge. U tehnici ofsetnog tiska uslijed kontakta tiskovne forme s tiskovnom podlogom dolazi do apsorpcije otopine za vlaženje u strukturu papira te se on ukupnom površinom povećava. Najprije su u teorijskom dijelu rada objašnjeni pojmovi dimenzionalne stabilnosti papira, opis principa ofsetnog tiska kao i demonstracija problema koji nastaju zbog dimenzionalne promjene, te fizikalne zakonitosti na koje se oslanja holografška interferometrija, metoda kojom se veličina nastale promjene na tiskovnoj podlozi pokušava izmjeriti.

Holografija je metoda stvaranja trodimenzionalne slike objekta na dvodimenzionalnoj podlozi. Za razliku od fotografije, koja na fotoosjetljivi materijal bilježi različite amplitude elektomagnetskog zračenja koje na njega pada, holografija osim amplitude bilježi još jedan važan podatak, fazu vala. Zanimljivo je da je holografija otkrivena mnogo prije nego je izrađen prvi hologram, a njen izumitelj Dennis Gabor je prilikom otkrića holografije radio na poboljšanju moći razlučivanja elektronskog mikroskopa.

Holografška interferometrija podrazumijeva snimanje holograma i promatranje deformacija u realnom vremenu. No interferentnu sliku moguće je izravno zabilježiti CCD kamerom i spremiti u memoriju računala. Tako spremljena slika sadrži informaciju analognu postupku klasične holografške interferometrije, ali digitalni pristup raščlambi interferograma ima cijeli niz prednosti s obzirom na programske mogućnosti računala.

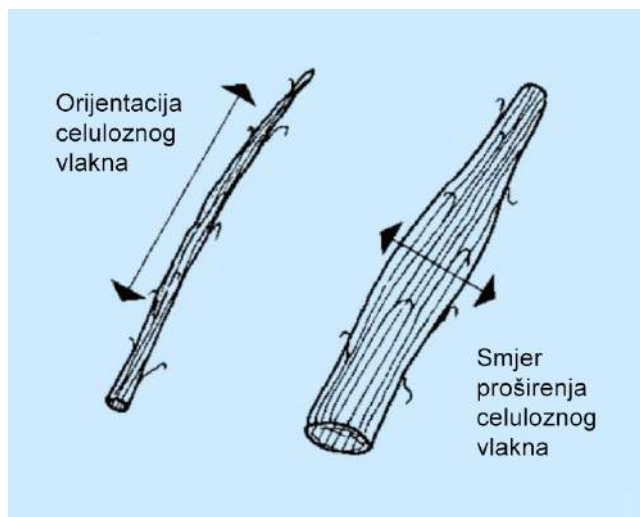
## 2. SVOJSTVA PAPIRA

Papir je porozni materijal izrađen od celuloznih vlaknaca i njihovih fragmenata koji se međusobno isprepliću tako da tvore mrežastu strukturu. List papira sastoji se od nekoliko slojeva isprepletenih vlaknaca. Papir se industrijski proizvodi na papir stroju u kontinuiranoj traci iz razrjeđene suspenzije celuloznih vlaknaca u vodi. Mrežasta struktura vlaknaca može se djelomično ispuniti sredstvima koja nisu vlakanca, a poboljšavaju svojstva papira (punila i keljiva). [1]

Smjer u kojem papirna traka teče na papir stroju zove se uzdužni smjer, a smjer okomit na njega poprečni. Celulozna vlakanca se zbog proizvodnog procesa orijentiraju paralelno sa uzdužnim smjerom pa tako i papir ima svoj uzdužni i poprečni smjer. Bitno je poznavati podatke o smjeru jer se neka svojstva papira u pojedinim smjerovima mogu bitno razlikovati. Mehanička svojstva koja ovise o smjeru papira su otpornost prema kidanju, istezljivost papira, otpornost prema savijanju i promjena dimenzije papira uslijed promjene vlažnosti. U uzdužnom smjeru veća je otpornost prema kidanju i savijanju, a u poprečnom istezljivost i promjena dimenzije uslijed vlažnosti. [2]

### ***2.1. Dimenzionalna stabilnost papira***

Celulozna vlakanca su higroskopna, što znači da na sebe privlače vlagu. S obzirom na svoju građu, vlakanca ne mijenjaju svoj oblik jednako u svim smjerovima već onako kako je prikazano na slici 1. Na promjenu dimenzije tiskovne podloge u uzdužnom i poprečnom smjeru više ili manje utječe vlaga. Ta promjena naziva se dimenzionalna stabilnost. Poznavanje veličine promjene dimenzije u uzdužnom i poprečnom smjeru vrlo je važno za tiskovne podloge, a naročito za papir. Naravno, poželjna je što manja promjena dimenzija papira tijekom procesa tiska, a i kasnije tijekom dorade. One tiskovne podloge kod kojih dolazi do velikih promjena dimenzija uslijed promjene vlažnosti daju naslutiti da će u višebojnom ofsetnom tisku najvjerojatnije doći do problema s paserom. [2]



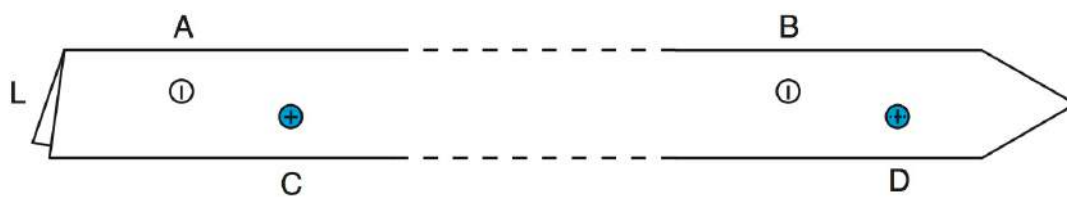
**Slika 1.** Celulozno vlakno prije i nakon kontakta s vlagom

(\*\*\*<http://materijali.grf.unizg.hr/media/vjezba%207%20papir.pdf>, *Katedra za materijale u grafičkoj tehnologiji*, 12.8.2014.)

#### 2.1.1. PIRA PET uređaj za mjernje vlage u papiru

Pomoću PIRA PET uređaja može se na jednostavan način ispitati dimenzionalna stabilnost papira pri različitoj relativnoj vlažnosti. Ovaj uređaj napravljen je u obliku mača (dužine otprilike 1m, širine 6cm) tako da se koristi za mjerenje dimenzionalne stabilnosti u snopu papira. Izrađen je od duraluminija<sup>1</sup>. Na slici 2 skiciran je PIRA PET uređaj. S donje strane ima dva noža (A i B) koji se razmaknuti 50,8 cm. Jednako razmaknuti su i stakleni prozorčići C i D s ucrtanim križem, od kojih jedan ima graduiranu skalu. Pritiskom na podlogu L, noževi zarezuju papir. Mjerenje se vrši na način da se PIRA PET uvuče u snop papira koji nije u ravnoteži s vlagom u tiskari, markira se, a zatim se markirani papir izvadi i objesi da slobodno visi u atmosferi tiskare. Nakon 15 minuta markirana se mjesta promatraju kroz staklene prozorčiće te se na graduiranoj skali D očita promjena razmaka marki A i B. Ukolika je ta promjena 0,5% ili veća, može doći do problema s paserom u procesu tiska. [2]

<sup>1</sup> DURALUMINIJ – legura aluminija, bakra, magnezija i mangana



**Slika 2.** PIRA PET uređaj za određivanje dimenzionalne stabilnosti papira (Golubović A. (1993). *Svojstva i ispitivanje papira*, Grafički fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb)



### **3. OSNOVNE KARAKTERISTIKE OFSETNOG TISKA**

Ofsetni tisak glavni je predstavnik plošnog tiska. Za razliku od visokog i dubokog tiska, kod ofsetnog tiska se tiskovni elementi i slobodne površine nalaze u istoj ravnini. Površina tiskovne forme selektivno prihvaća tiskarsku boju, a da bi to bilo moguće tiskovne se površine od slobodnih moraju razlikovati po afinitetu prema vrsti molekula. Tiskovni elementi moraju biti oleofilni jer su tiskarske boje za ofsetni tisak na bazi ulja, a slobodne površine moraju biti hidrofilne da bi se na njih mogla adsorbirati otopina za vlaženje koja u trenutku prijenosa bojila sa temeljnog na ofsetni cilindar daje jasne granice tiskovnih elemenata. [3]

Nekada se smatralo da prisutstvo otopine za vlaženje donosi samo poteškoće u tisku, no danas osim problema donosi i korist. Tako ona čisti ofsetni cilindar, hladi ga, regenerira i produžuje mu vijek trajanja. Dva glavna problema koja nastaju zbog utjecaja otopine za vlaženje su promjena reoloških svojstava tiskarske boje i promjena dimenzije tiskovne podloge u procesu tiska. Ovaj drugi problem, odnosno rastezanje tiskovne podloge, predmet je istraživanja ovog diplomskog rada. [4]

#### ***3.1. Definiranje kvalitete otopine za vlaženje***

Važan segment definiranja kvalitete plošnog tiska je kemijska kvaliteta otopine za vlaženje koja se nanosi na tiskovnu formu neposredno prije nanošenja bojila. Uloga vlaženja u ofsetnom tisku je brzo i cjelovito prekrivanje hidrofilnih slobodnih površina vodenom otopinom takvih karakteristika da mogu odgovarati velikom broju zahtjeva koje pred kemiju postavlja moderna koncepcija tiskarstva. Jednostavne otopine za vlaženje sadrže vodu, gumiarabiku, otapala, neki konzervansi te odgovarajuću smjesu kiselina i soli koje na otopinu djeluju kao pufer. [5]

Parametri koji se prate u svakoj otopini za vlaženje kako bi ona dala željene rezultate su kiselost, tvrdoća, vodljivost, količina površinski aktivnih tvari, količina konzervansa itd. Osim osnovne uloge, a to je da spriječi

prodiranje bojila na slobodne površine, otopina za vlaženje u procesu tiska mora održavati hidrofilni karakter slobodnih površina, omogućiti brzo čišćenje boje sa slobodnih površina, omogućiti brzo širenje vode po površini tiskovne forme, omogućiti jednoliki tok vode po valjcima za vlaženje, podmazivati ploče, valjke i ofsetni cilindar, kontrolirati emulgiranje vode i boje te kontrolirati hlađenje. [6]

Kada otopina za vlaženje nema sva zadana svojstva, nastaju problemi u tisku, odnosno dobiveni otisak nije željene kvalitete. Ukoliko na tiskovnoj formi nedostaje otopine za vlaženje dolazi do prihvatanja boje na slobodne površine i pojave koja se naziva toniranje. Toniranje također može nastati i ukoliko otopina za vlaženje ima nepravilnu kiselost (pH), ukupnu tvrdoću (°dH) i vodljivost. Ukoliko pak na tiskovnu formu dospije veća količina otopine za vlaženje od predviđene događa se takozvano ispiranje boje uz rub otiska koji je bliži čeonim markama, a vrlo često cijeli otisak postaje ispraniji i svjetliji. [5]



**Slika 3.** Ispiranje otiska (Zjakić I. (2007). *Upravljanje kvalitetom ofsetnog tiska*, Hrvatska sveučilišna naklada, Zagreb)



**Slika 4.** Toniranje otiska (Zjakić I. (2007). *Upravljanje kvalitetom ofsetnog tiska*, Hrvatska sveučilišna naklada, Zagreb)

Neželjena pojava koja nam je ovom radu najbitnija je nepravilan paser. Ako su opsezi sva tri cilindra pravilno podešeni, a na otisku procesne boje ne nasjedaju jedna na drugu kako bi trebale, već s određenim pomakom, došlo je do rastezanja tiskovne podloge (papira). Zbog celuloze koju sadži, papir na sebe prima vlagu iz otopine za vlaženje. Celulozna vlakanca bubre i mijenjaju svoju dimenziju, a samim time dimeziju mijenja cijela tiskovna podloga. Kako izgleda otisak sa nepravilnim paserom vidljivo je na slici 5.



**Slika 5.** Problem lošeg pasera na otisku (Zjakić I. (2007). *Upravljanje kvalitetom ofsetnog tiska*, Hrvatska sveučilišna naklada, Zagreb)

## 4. INTERFERENCIJA VALOVA SVJETLOSTI

Svjetlost istovremeno posjeduje i čestična i valna svojstva. Fenomen interferencije, kao i ogib zrake svjetla na pukotini, dokazuje valno svjetlosno svojstvo. Susret dvaju valova u prostoru naziva se superpozicija valova. Kada nastane superpozicija dvaju mehaničkih valova dolazi do njihove međusobne interakcije, odnosno interferencije. Ovisno o rezultatnoj amplitudi interagirajućih valova, interferencija će biti konstruktivna ili destruktivna. Kod konstruktivne interferencije rezultatna amplituda veća je od bilo koje amplitude individualnih valova koji čine tu superpoziciju, dok je kod destruktivne interferencije rezultatna amplituda manja od individualnih. [7]

Ako promatramo dvije žarulje postavljene jednu kraj druge, nećemo uočiti pojavu interferencije jer se valovi jedne žarulje emitiraju neovisno o valovima druge žarulje i njihova emisija nema konstantnu faznu razliku u vremenu. Valovi svjetlosti iz običnih izvora kao što je žarulja nastaju slučajnim promjenama od svakih  $10^{-8}$  s što je nemoguće primjetiti ljudskim okom. Takve izvore, koji imaju brzu promjenu razlike u fazi, nazivamo nekoherentnima. [7]

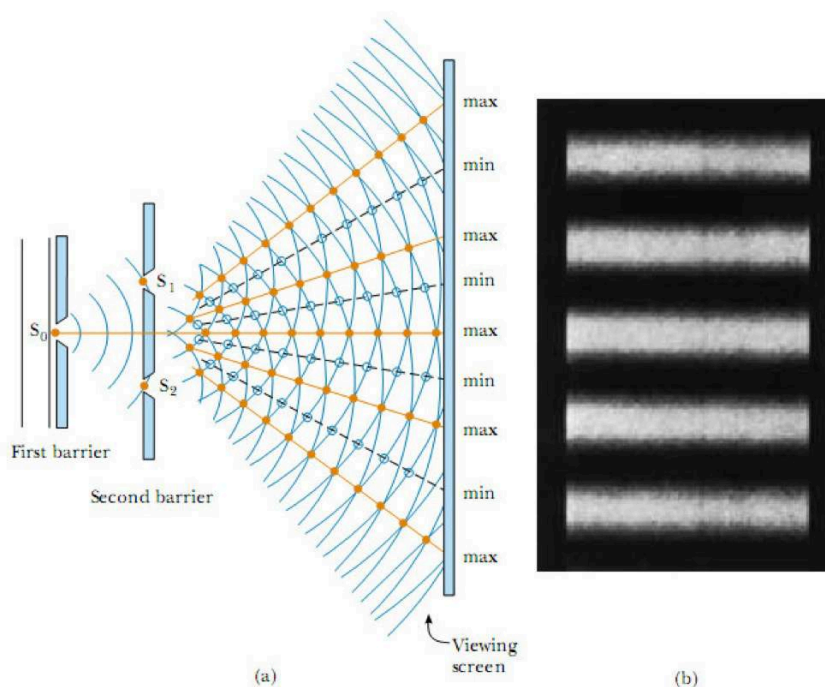
Kako bi imali održivu interferenciju koju možemo promatrati, potrebno je zadovoljiti dva uvjeta. Izvor zračenja mora biti koherentan tj. razlika u fazi jednog vala u odnosu na drugi mora biti konstantna. Drugi uvjet odnosi se na monokromatičnost tj. poželjno je da izvor sadrži zračenje samo jedne valne duljine. Interferenciju je moguće objasniti i pomoću zvučnih valova pa primjerice ako postavimo dva zvučnika spojena na isto pojačalo jedno pored drugoga, možemo primjetiti interferenciju jer su zvučnici koherentni tj. njihov odziv prema pojačalu je istovremen. [7]

### 4.1. *Youngov eksperiment*

Interferenciju valova svjetlosti iz dva izvora prvi je demonstrirao Thomas Young 1801. godine. To je najstariji i najjednostavniji eksperiment za dobivanje pruga interferencije. Pokus je zasnovan na principu razdvajanja valne fronte.

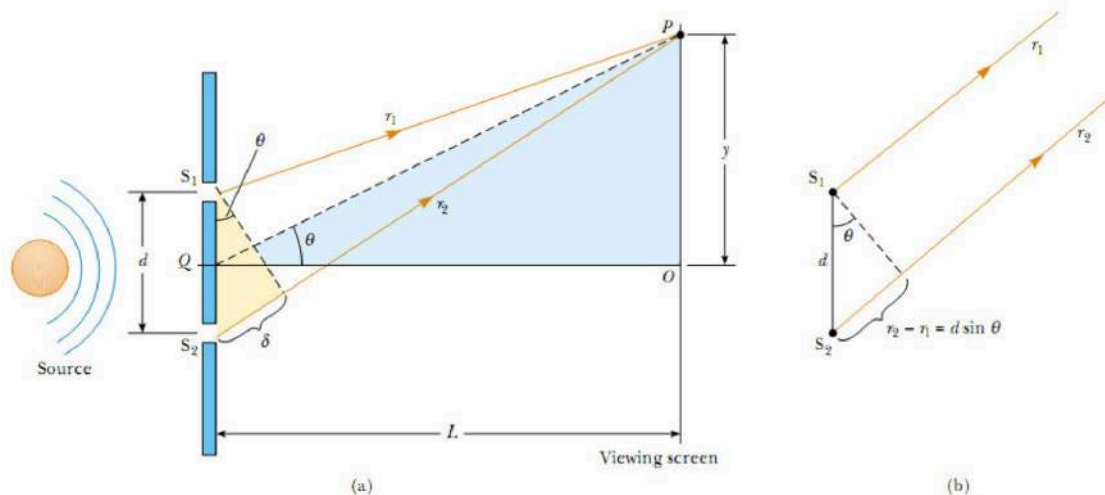
Prema Huygensovom principu valna fronta nekog točkastog izvora koja nailazi na pukotinu nastavlja svoje širenje kao kuglasti val stalne amplitude. [8]

Shematski prikaz eksperimenta vidljiv je na slici 6. Ulazna svjetlost dolazi na prvu prepreku na kojoj se nalazi tanki zarez (pukotina)  $S_0$ . Val koji nastaje iz te pukotine dolazi na drugu prepreku koja sadrži dvije paralelne pukotine  $S_1$  i  $S_2$ . Te dvije pukotine služe kao koherentni izvori jer valovi koji nastaju iz njih tvore iste valne fronte i zbog toga imaju konstantnu razliku u fazi (Huygensovo načelo). Svjetlost koja iz izvora  $S_1$  i  $S_2$  pada na zastor tvori na zastoru vidljive svijetle i tamne linije. Svijetle linije rezultat su konstruktivne, a tamne linije destruktivne interferencije. [8]



**Slika 6.** Youngov eksperiment s dvije pukotine

(\*\*\*[http://www.phy.pmf.unizg.hr/fizgeo/tonejc/fizikalna\\_optika.pdf](http://www.phy.pmf.unizg.hr/fizgeo/tonejc/fizikalna_optika.pdf) - Prirodoslovno matematički fakultet, Odsjek za fiziku, 12.8.2014.)



**Slika 7.** Youngov eksperiment s dvije pukotine – kvantitativno objašnjenje

(\*\*\*[http://www.phy.pmf.unizg.hr/fizgeo/tonejc/fizikalna\\_optika.pdf](http://www.phy.pmf.unizg.hr/fizgeo/tonejc/fizikalna_optika.pdf) - Prirodoslovno matematički fakultet, Odsjek za fiziku, 12.8.2014.)

Eksperiment se može kvantitativno objasniti pomoću shematskog prikaza na slici 7. Prepreka s pukotinama  $S_1$  i  $S_2$  postavljena je na udaljenosti  $L$  od zastora.  $S_1$  i  $S_2$  udaljene su za  $d$  i izvor je monokromatski (jedne valne duljine). Da bi došao do bilo koje proizvoljne točke  $P$ , val iz pukotine  $S_2$  mora proći veći put negoli val iz pukotine  $S_1$  za udaljenost  $d \sin \theta$ . Udaljenost koju jedan val mora proći u odnosu na drugi zove se razlika u putu i označava se s  $\delta$ . Ako uzmemo aproksimativno da su  $r_1$  i  $r_2$  paralelni, što je u aproksimaciji dozvoljeno jer je  $L$  puno veći od  $d$ , tada je  $\delta$  dana ovim izrazom:

$$\delta = r_2 - r_1 = d \sin \theta \quad (1)$$

Iznos  $\delta$  određen je kada god dva vala u fazi dođu u točku  $P$ . Ako je  $\delta$  nula ili neki cijeli broj, tada su množitelj valne duljine dva vala u fazi u točki  $P$  u kojoj kao rezultat primjećujemo konstruktivnu interferenciju. Prema tome, uvjet za svijetle linije, odnosno konstruktivnu interferenciju u točki  $P$  glasi:

$$\delta = d \sin \theta = m\lambda \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (2)$$

Broj  $m$  nazivamo redni broj. Centralni svijetli maksimum možemo uočiti kada imamo  $\theta = 0$  ( $m = 0$ ) a ovaj maksimum zovmo nulti maksimum. Prvi maksimum sa svake strane dobijemo kada je  $m = \pm 1$ , i njega nazivamo prvi maksimum ili maksimum rednog broja jedan itd.

Kada je  $\delta$  višekratnik od  $\frac{\lambda}{2}$ , dva vala dolaze u točku P i oni su u protufazi. Daju destruktivnu interferenciju u točki P i izraz za destruktivnu interferenciju ili tamne linije glasi:

$$d \sin \theta = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (3)$$

Korisno je dobiti izraz koji daje pozicije tamnih i svijetlih linija mjerenih vertikalno od točke O do točke P. Uzimajući u obzir da je  $L \gg d$ , to povlači da je  $d \gg \lambda$ . U praksi je često  $L = 1m$ ,  $d$  je u milimetrima, a  $\lambda$  je u mikrometrima za vidljivu svjetlost, pa možemo reći da su izrazi ranije uzeti u obzir dobri. Ako su zadovoljeni svi navedeni uvjeti,  $\theta$  je malen pa možemo koristiti aproksimaciju da je  $\sin \theta = \tan \theta$ . Tada iz trokuta OPQ (slika 7) vrijedi slijedeća jednakost:

$$y = L \tan \theta \approx L \sin \theta \quad (4)$$

Rješavajući jednadžbu koja je uvjet za svijetle linije i uvodeći supstituciju dobijemo izraz koji daje poziciju svijetlih linija mjerenih od O, a izraz glasi:

$$y_{svijetlo} = \frac{\lambda L}{d} m \quad (5)$$

Koristeći jednadžbu koja daje uvjet za destruktivnu interferenciju i aproksimaciju koja je ranije navedena, možemo naći lokacije tamnih linija. Izraz kojim dobivamo mjesta tamnih linije glasi:

$$y_{tamno} = \frac{\lambda L}{d} \left(m + \frac{1}{2}\right) \quad (6)$$

Možemo zamijetiti da Youngov pokus daje metodu mjerenja valne duljine svjetlosti. Iako je tehniku razvio prvenstveno kako bi mogao odrediti valnu duljinu svjetlosti i u početku nije bio svjestan interferencije, ovaj eksperiment dao je veliki kredibilitet valnom modelu svjetlosti. [8]

#### 4.1.1. Intenzitet pruga interferencije

Pukotine S1 i S2 ponašaju se kao izvori dva koherentna elektromagnetska vala za čije električne vektore u točki P prostora možemo pisati:

$$E_1 = E_0 \cos(kr_1 - \omega t) \quad i \quad E_2 = E_0 \cos(kr_2 - \omega t) \quad (7)$$

Ta se dva vala u točki P zbrajaju te dobivamo rezultatno titranje:

$$E = E_1 + E_2 = E_0 [\cos(kr_1 - \omega t) + \cos(kr_2 - \omega t)] = 2E_0 \cos \frac{kr_1 - \omega t + kr_2 - \omega t}{2} \cos \frac{kr_1 - kr_2}{2} \quad (8)$$

ili

$$E = 2E_0 \cos \frac{k(r_1 - r_2)}{2} \cos \left( k \frac{r_1 + r_2}{2} - \omega t \right) \quad (9)$$

Budući da je  $r_1 - r_2 = d \sin \theta$  vidimo da amplituda rezultatnog vala ovisi o mjestu gdje interferenciju promatramo o udaljenosti  $d$  među pukotinama. Valovi dani gornjim relacijama razlikuju se u fazi za neki kut  $\Phi$  (razlika faza):

$$\Phi = k(r_1 - r_2) = kd \sin \theta = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta \quad (10)$$

Intenzitet elektomagnetskog vala (svjetlosti) i točki I jedanka je srednjem iznosu Poyntingova vektora<sup>2</sup> u toj točki:

---

<sup>2</sup> U elektromagnetizmu Poyntingov vektor predstavlja snagu elektromagnetskog polja po jedinici površine, a mjerna jedinica mu je  $W/m^2$ . Poyntingov vektor se definira kao  $S = \frac{1}{\mu_0} E * B$  gdje je  $\mu_0$  permeabilnost vakuma,  $E$  električno polje i  $B$  magnetsko polje. [Electromagnetism (2nd Edition), I.S. Grant, W.R. Phillips, Manchester Physics, John Wiley & Sons, 2008, ISBN 978-0471927129]



$$\bar{P} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} (\text{amplituda električnog polja})^2 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} 4E_0^2 \cos^2 \frac{k(r_1 - r_2)}{2} =$$

$$\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} 4E_0^2 \cos^2 \frac{\Phi}{2} \quad (11)$$

Budući da je intenzitet koji pojedini izvor daje u točki P jednak:

$$I_0 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} E_0^2, \quad (12)$$

to je resultantni intenzitet:

$$I = 4I_0 \cos^2 \frac{\Phi}{2} = 2I_0 (1 + \cos \Phi) \quad (13)$$

## 5. INTERFEROMETRIJA

Interferometrija je tehnika dijagnosticiranja svojstava dvaju ili više valova proučavajući interferenciju dobivenu superpozicijom. Instrument koji interferira te valove zove se interferometar. Optička interferometrija kombinira dva ili više svjetlosna vala u optičkom instrumentu na način da dobijemo interferenciju. Središnji element interferencije je dijelitelj snopa (beam splitter). U prošlosti su se dva koherentna izvora mogla dobiti smo na način da iz jednog izvora načinimo dva. Danas je moguće uskladiti dva laserska izvora te njima izvoditi eksperimente s interferencijom. Prvi interferometar bio je slavni Youngov pokus s dvije pukotine 1805 godine. Tada su se kao izvori koristili izvor bijele svjetlosti i monokromatska svjetlost iz atomskih izvora. Razvojem lasera postalo je mnogo lakše postići optičku interferenciju što je dovelo do razvoja primjene interferometara u fizici i mnogim drugim područjima. [9]

Interferometrom je moguće mjeriti male pomake nekog predmeta. Promatramo li sliku preklopljenih valova koji se reflektiraju s površine predmeta i površine mirnog zrcala, primjetiti ćemo da ta dva vala interferiraju i daju na zaslonu naizmjenično tamne i svijetle koncentrične kružnice koje se pomiču kako se miče predmet. [9]

Interferometri se koriste u meteorologiji, ispitivanju površina, mjerenjima mehaničkog naprezanja, mjerenjima brzine, u astronomiji itd. Poznajemo Michelsonov interferometar, Mach-Zenderov interferometar, Sagnacov interferometar i Fabry-Perotov interferometar. [10]

### 5.1. *Michelsonov interferometar*

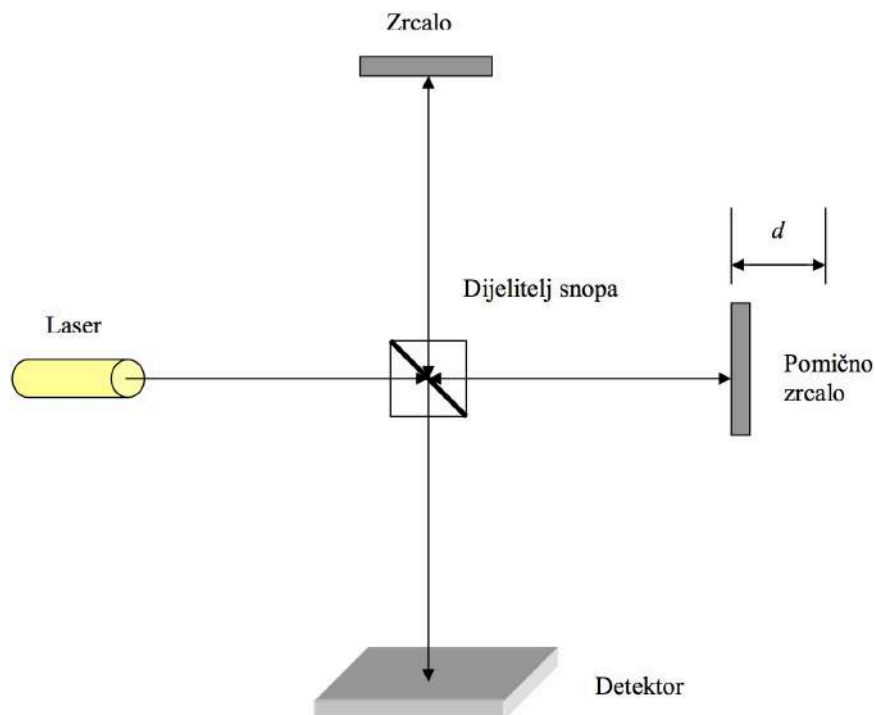
Michelsonov interferometar najčešći je u optičkoj interferometriji. Izum je znanstvenika Alberta Abrahama Michelsona. Alberta A. Michelsona je fascinirala znanost, a posebno problem mjerenja brzine svjetlosti. 1877. godine izveo je svoj prvi pokus kojim je pokušao izmjeriti brzinu svjetlosti. Od tada je pokušavao unaprijediti mjerenja i radio je na svom interferometru. S Morleyem

1887. godine izveo je Michelson-Morleyev eksperiment kojim su dokazali nepostojanje etera. Dokazali su da se svjetlost u svim inercijskim referentnim sustavima u vakuumu širi istom brzinom, bez obzira u kakvom se međusobnom gibanju oni nalaze. Time su doveli do specijalne teorije relativnosti. [10]

Michelson je radio i na astronomskim interferometrima kojima je mjerio promjere zvijezda. Nobelovu nagradu dobio je 1907. godine za svoje optičke instrumente, te spektroskopska i metrološka istraživanja koja su izvedena uz njegovu pomoć. [11]

Michelsonov interferometar koristi se za detekciju gravitacijskih valova, za određivanje malog pomaka predmeta, za mjerenje indeksa loma nekog sredstva. Može se koristiti i za podešavanje uređaja koji služe za otkrivanje planeta obližnjih zvijezda. [9]

Michelsonov interferometar sastoji se od lasera, djelitelja snopa (beam splitter), koji djelomično propušta, a djelomično reflektira svjetlost koja dolazi iz izvora, od dva zrcala i detektora, koji je u ovom slučaju bio zastor. Shema Michelsonovog interferometra vidljiva je na slici 8.



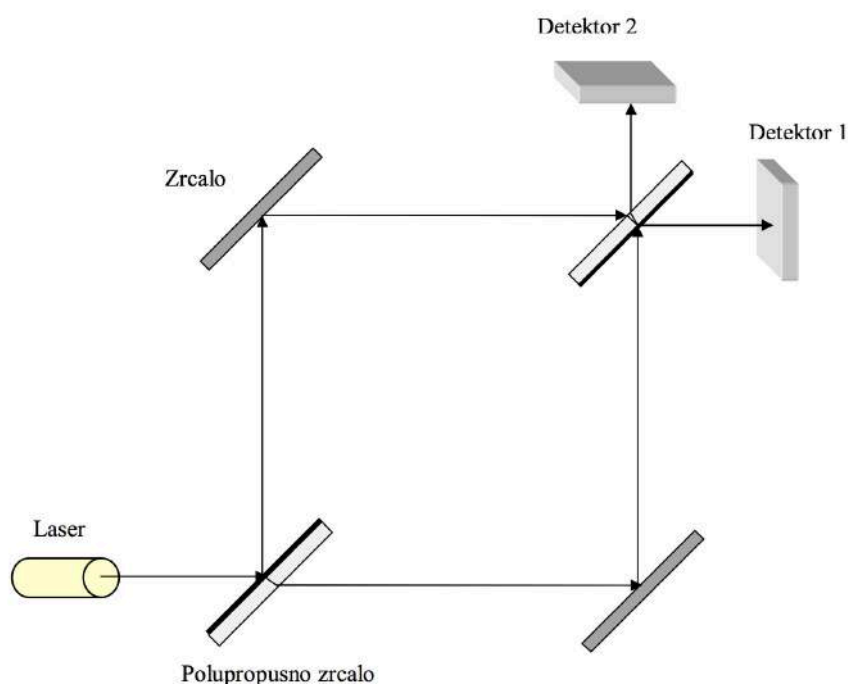
**Slika 8.** Shema Michelsonovog interferometra (Marić M. (2008). *Fizika s laserskim pointerima, Michelsonov i Mach Zehnderov interferometar*, diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet, Fizički odsjek)

Prvi snop ide na djelitelj snopa gdje se odbija, ide do prizme koja služi kao zrcalo, tamo se reflektira, dolazi ponovno do djelitelja snopa gdje prolazi do zaslona. Drugi snop prolazi kroz mikroskopsko stakalce, reflektira se na prizmi i dolazi do djelitelja snopa gdje se reflektira na zastor. Na zastoru dolazi do konstruktivne interferencije kada se putevi jednog i drugog snopa razlikuju za cijelu valnu duljinu. Važno je da putevi koje prevaljuju jedan i drugi snop budu jednaki. Kada se putevi jednog i drugog razlikuju za pola valne duljine tada dolazi do destruktivne interferencije. Za različite valne duljine (različite boje) dobivati ćemo različite širine pruge interferencije. Jedno od zrcala drži se nepomičnim dok se drugo može pomicati pomoću preciznog vijka. Tako se pomicanjem drugog zrcala za četvrtinu valne duljine, put snopa koji se na djelitelju snopa prolazi, mijenja za polovinu valne duljine. To izaziva promjenu interferentne slike tako da su tamni prstenovi interferencije prije pomicanje zamijenjeni sa svjetlim prstenima poslije pomicanja. Brojeći promjene koje se

dogode za vrijeme pomicanja zrcala možemo odrediti za koliko se valnih duljina zrcalo pomaknulo. [10]

## 5.2. Mach-Zehnderov interferometar

Mach-Zehnderov interferometar izveden je iz Michelsonovog interferometra. Napravili su ga Ludwig Mach i Ludwig Zehnder. To je uređaj koji se koristi za utvrđivanje pomaka u fazi koji je uzrokovan nekim uzorkom koji se nalazi na putu jedne od dvije koherentne zrake. Mach Zehnderov interferometar sastoji se od dva djelatila snopa (za razliku od Michelsonovog koji ima samo jedan) , dva zrcala, dva detektora i lasera. Slika 9 prikazuje shemu Mach-Zehnderovog interferometra. [11]



**Slika 9.** Shema Mach-Zehnderovog interferometra (Marić M. (2008). *Fizika s laserskim pointerima, Michelsonov i Mach Zehnderov interferometar*, diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet, Fizički odsjek)

Snop iz lasera dolazi na prvi djelitelj snopa. Snop se dijelom reflektira, a dijelom prolazi kroz djelitelj snopa. Snop koji se reflektira dolazi na zrcalo na kojem se ponovno reflektira, te dolazi na drugi djelitelj snopa. Na tom djelitelju

se dijelom reflektira u detektor 2, a dijelom prolazi u detektor 1. Snop koji prolazi kroz prvi djelitelj snopa se reflektira na zrcalu u drugi djelitelj snopa. On se dijelom reflektira u detektor 1, a dijelom prolazi u detektor 2. [10]

Snop koji se reflektira na prvom djelitelju snopa dobiva promjenu u fazi za pola valne duljine. Nakon toga dolazi na zrcalo na kojem ponovo ima promjenu u fazi za pola valne duljine zbog refleksije. Na drugom djelitelju snopa, snop se lomi na gornjoj plohi stakla. Na donjoj plohi stakla dio koji se reflektira nema promjenu u fazi i taj se dio ponovno lomi na gornjoj plohi djelitelja snopa pa dolazi do dodatne promjene u fazi. Dio koji se prolazi kroz donju plohu djelitelja snopa ima neku promjenu u fazi koja ovisi o indeksu loma stakla. [10]

Snop koje prolazi kroz prvi djelitelj snopa, ima neku promjenu u fazi koja ovisi o indeksu loma stakla. Zatim dolazi do zrcala gdje se reflektira i ima promjenu u fazi za pola valne duljine. Na drugom djelitelju snopa dio snopa koji se reflektira ponovno ima promjenu u fazi za pola valne duljine, a dio koji se prolazi ima promjenu u fazi za neki iznos koji ovisi o indeksu loma stakla. Ako zbrojimo promjene u fazi prvog i drugog snopa koje dolaze na detektor 2, dobijemo da im se faze razlikuju za pola valne duljine. Ako se faze razlikuju za pola valne duljine doći će do destruktivne interferencije, pa na detektoru 2 neće biti svjetlosti. [10]

Ako zbrojimo promjene u fazi prvog i drugog snopa koji dolaze na detektor 1, dobijemo da imaju istu promjenu u fazi pa će doći do konstruktivne interferencije, odnosno sva će svjetlost otići u detektor 1 i biti će vidljive pruge interferencije. Sada je jasno zašto Mach Zehnderovim interferometrom možemo mjeriti promjenu u fazi na nekom uzorku. Uzorak stavimo na put jednog ili drugog snopa. Promjena faze na uzorku, uzrokovati će promjenu odnosa faza dva snopa i na detektoru 2 nećemo dobiti potpuno destruktivnu interferenciju. Mjerenjem količine svjetla koja dolazi na detektor 1 i detektor 2 možemo izračunati promjenu faze na uzorku. [10]

## 6. HOLOGRAFSKA INTERFEROMETRIJA

### 6.1. Hologram

Holografija datira još iz 1947. godine kada je znanstvenik Dennis Gabor pokušavajući unaprijediti moć ralučivosti elektronskog mikroskopa postavio temeljne principe holografije. Termin „holografija“ kreirao je iz grčkih riječi holos (cijel) i gramma (poruka). Nažalost, nije bio u mogućnosti svoj izum izvesti u praksi zbog nedostatka koherentnog izvora svjetla. Ova barijera prevladana je 1960. godine izumom lasera, čije je značenje bilo idealno za izradu holograma. [12]

### 6.2. Alati potrebni za snimanje holograma

#### 6.2.1. Laser

Laser (eng. Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) je optička naprava koja emitira koherentni skup fotona. Laserska je svjetlost monokromatična i usmjerena je u uskom snopu. Snop je koherentan, što znači da su elektromagnetski valovi koje emitira međusobno u istoj fazi i šire se u istom smjeru. [13]

Prvi komercijalno dostupan laser bio je He-Ne laser, 1961. godine, te je i danas još uvijek najčešće korišteni plinski laser. Cijena mu je niska, jednostavan je za rukovanje, ima dug vijek trajanja i moguće ga je koristiti u radu na mrežnoj struji od 220 V. [13]

Izlazna snaga lasera, mora biti najmanje 5mW, jer će u protivnom vrijeme ekspozicije biti veoma dugačko, i moguće vibracije, koje dopiru do optičkog stola, mogu uništiti snimljeni hologram. Laser manje izlazne snage može se upotrijebiti ukoliko se snima hologram dimenzija manjih od 10 x 12 cm, ali nije preporučljivo koristiti laser izlazne snage manje od 3 mW. U slučaju da su optički stol i okolina u kojoj se obavlja eksponiranje veoma stabilni, maksimalno vrijeme ekspozicije, uz koje će snimljeni hologram biti kvalitetan, je 10 minuta.

Što je veća izlazna snaga lasera potrebno vrijeme ekspozicije je kraće. Vrijeme ekspozicije ovisno je i o reflektivnosti objekta koji snimamo, o veličini objekta ili scene koju snimamo, kao i o općoj osjetljivosti materijala za snimanje. [13]

Laser kontrolira način na koji atomi pod utjecajem energije oslobađaju fotone. Danas postoji puno različitih tipova lasera, no osnovno načelo po kojemu funkcioniraju je isto. Plinoviti medij se stimulira da bi se atomi doveli u pobuđeno stanje. Za što efikasniji rad lasera potrebno je što više pobuđenih atoma. Prilikom vraćanja u osnovno stanje, elektroni emitiraju energiju u obliku fotona koji imaju različite valne duljine, ovisno o stupnju uzbuđenosti koji je elektron imao prije emitiranja. Dva elektrona istog atoma na istome stupnju uzbuđenosti emitirati će fotone iste valne duljine. Ako tako otpušteni foton dođe u kontakt sa drugim atomom koji ima elektron na istom stupnju uzbuđenosti doći će do stimulirane emisije. Taj ulazni foton može stimulirati daljnju emisiju takvu da će drugi foton (koji će se pojaviti kada se drugi elektron vraća u osnovno stanje) vibrirati istom frekvencijom i smjerom kao i ulazni foton. Upravo zbog toga ta se vrsta emisije naziva stimuliranom emisijom, jer je organizirana, za razliku od emisije kod obične svjetlosti koja je slučajna. Osim stimulirane emisije drugo svojstvo bitno za funkcioniranje lasera su zrcala. Laser ima par zrcala na kojima se reflektiraju fotoni specifičnih valnih duljina i faza te tako putuju naprijed-nazad kroz sam medij. Zbog tog uzastopnog vraćanja fotona, pri čemu se svakim prolaskom zbog stimulirane emisije broj fotona povećava, dolazi do kaskadnog efekta. Vrlo brzo nastaje velik broj fotona istih svojstava. Zrcalo na kraju lasera je "polu-srebrno" što znači da reflektira dio svjetlosti, a dio propušta. Upravo ta svjetlost koja se propušta je ona koja se naziva laserskom svjetlošću. Za razliku od običnih svjetiljki kod kojih se svjetlost koja se emitira raspršuje, laser je građen tako da je snop koji se propušta vrlo uzak. Upravo stoga je ta zraka svjetlosti izrazito koncentrirana i jaka te se laseri koriste tamo gdje je potrebno "osvijetliti" izrazito male površine. [14] [15]

Osnovna svojstva lasera su: laserska svjetlost je monokromatska - sadrži samo jednu specifičnu valnu duljinu (jednu boju), laserska svjetlost je koherentna - gibanje svih fotona je usklađeno, "organizirano", laserska svjetlost



je jako direktna - laserska zrake je jako uska, jaka i koncentrirana. [16]

Laseri koji se najčešće koriste pri izradi holograma su:

- Helij-Neon laser (He-Ne)
- Argonski laser
- Kripton laser
- Kadmij laser

U tablici 1 vidljive su karakteristike svake od navedenih vrsta lasera; dominantna valna duljina, snaga zračenja i duljina koherencije.

**Tablica 1.** Laseri i njihove osnovne tehničke karakteristike

VRSTA LASERA	DOMINANTNA VALNA DULJINA	SNAGA ZRAČENJA	DULJINA KOHERENCIJE
He-Ne laser	633 nm (crvena boja)	Do 60 mW	15-20 cm
Ar laser	514 nm	2-5 W	do 5 cm
	488 nm	1-3 W	
Kr laser	647 nm	1-4 W	do 5 cm
Cd laser	440 nm	do 50 mW	15-20 cm

### 6.2.2. Djelitelj snopa

Djelitelj snopa je djelomično propusno zrcalo, kojim se upadni snop cijepa na dva ili više sekundarnih snopova. On je izrazito važna optička komponenta sustava za snimanje holograma. On može snimanje holograma olakšati ili otežati. Ima tri funkcije: dijeli zraku svjetla iz lasera u dvije zrake, regulira omjer intenziteta referentne i objektne zrake, te usmjerava zraku svjetla koja se reflektira u razdvajaču svjetla. [17]

Dvije zrake svjetla, u sustavu za snimanje holograma, nužne su za dobivanje visoko kvalitetnog holograma. Jedna zraka zove se referentna zraka, a druga objektna zraka. Nakon razdvajanja zraka u djelitelju snopa, te se dvije zrake ponovno spajaju na holografskoj ploči, interferiraju, i stvaraju hologram. [17]

Djelitelj snopa može biti kružni varijabilni, klizni i prizmatični, te linearni varijabilni djelitelj snopa. Najkvalitetniji tip jest kružni varijabilni djelitelj snopa. Ovaj djelitelj snopa ima kotačić za podešavanje stupnja reflektivnosti, za kontrolu količine reflektiranog i propuštenog svjetla (zraka svjetla treba upadati na oslojenu stranu razdvajajuća svjetla). Okretanjem kotačića za podešavanje stupnja reflektivnosti, od 0 do 360°, smanjuje se intenzitet reflektirane zrake, a raste intenzitet propuštene zrake svjetla. Možemo birati da li će kao referentna zraka pri snimanju holograma poslužiti reflektirana ili propuštena zraka u djelitelju snopa. [17]

U procesu snimanja holograma postoji važan odnos između intenziteta referentne i objektne zrake u ravnini holografske ploče. Taj omjer, zove se omjer intenziteta zraka svjetla. Intenzitet referentne zrake, mora uvijek biti jednak ili veći od intenziteta objektne zrake u bilo kojoj točki koja leži u ravnini holografske ploče. Podešavanje intenziteta objektne i referentne zrake uvelike je olakšano korištenjem varijabilnog djelitelja snopa, jer on omogućava povećavanje ili smanjivanje intenziteta reflektirane zrake, bez promjene njezinog smjera. [17]

### 6.2.3. Zrcala

Uloga zrcala u optičkom sustavu je usmjeravanje referentnog i objektnog snopa u različitim smjerovima na optičkom stolu. Slika zrcala koja se koriste pri snimanju holograma mnogo je oštija od slike uobičajenih zrcala, koja susrećemo u svakodnevnom životu i nikada nema blještavila. Razlog tomu je činjenica, da su ova zrcala posrebrana s vanjske strane, dok su uobičajena zrcala posrebrana iznutra. Nekoliko ključnih prednosti je povezano s tom činjenicom. Prva prednost je nepostojanje blještavila. Naime, blještavilo koje se javlja kod klasičnih zrcala, uzrokovano je reflektiranjem svjetla direktno s površine stakla prije nego ono dođe do sloja srebra. Kod zrcala za snimanje holograma nema stakla između svjetla i sloja srebra, pa stoga primjenom ovih zrcala nema blještavila. Kako nema stakla između upadnog svjetla i sloja srebra, nema niti interferencije između svjetla reflektiranog od stakla i svjetla

reflektiranog od srebra. U slučaju koherentnog svjetla, na ovaj je način sačuvan integritet zrake, jer nema pomaka u fazi između zraka svjetla uzrokovanog razlikom optičkoga puta, do koje dolazi pri reflektiranju svjetla od dvaju prostorno odvojenih medija. Zbog navedenih prednosti ova zrcala daju toliko oštru i jasnu sliku, da je teško i primijetiti da se gleda sliku u zrcalu, a ne stvarni objekt, ali zbog toga imaju i jedan nedostatak. Naime, veoma se lako ogrebu, pa se njihova površina smije dodirivati isključivo prstima, a čiste se pomoću dvaju organskih otapala. Najprije se isperu acetonom, a zatim se aceton ispere metanolom, koji brzo isparava sa površine zrcala. Sve navedeno za zrcala vrijedi i za djelatelj snopa, stoga iz istih razloga, posrebrana strana djelatelja snopa mora biti okrenuta prema laseru. Ukoliko zraka ne pada najprije na srebro, tada se upadna zraka dijeli dva puta, jednom od stakla i drugi put od srebra. [18]

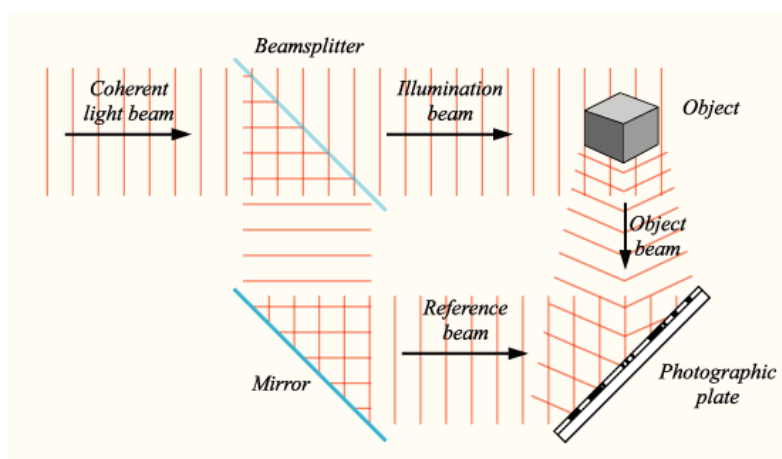
#### *6.2.4. Divergentne leće*

Uloga divergentnih leća jest da šire referentni i objektni snop svjetla iz lasera (koji je izvorno veoma malog promjera), kako bi holografška ploča i objekt, bili jednoliko osvjetljeni. Divergentne leće trebaju biti jednostavne bikonkavne leće, ili se u tu svrhu mogu koristiti kompleksnije optičke komponente, kao što su mikroskopski objektivi, bilo zasebno, ili u kombinaciji sa optičkim uređajem zvanim prostorni filter. Jednostavne bikonkavne leće sasvim su dovoljne, ukoliko je njihova površina čista i bez ogrebotina. Sve optičke komponente (djelatelj snopa, zrcala, divergentne leće, i parabolična zrcala) moraju biti čiste i bez ogrebotina, da bi snimljeni hologram bio jasan i visoko kvalitetan. [18]

### **6.3. Snimanje i rekonstrukcija holograma**

Na slici 10 prikazana je shema snimanja holograma nekog objekta. Iz lasera izlazi snop monokromatskog, koherentnog zračenja i nailazi na djelatelj snopa. Djelatelj snopa je optički sustav koji proširuje uski snop zraka u široki snop paralelnih zraka. Pomoću jednog djelatelja snopa laserska zraka se širi i

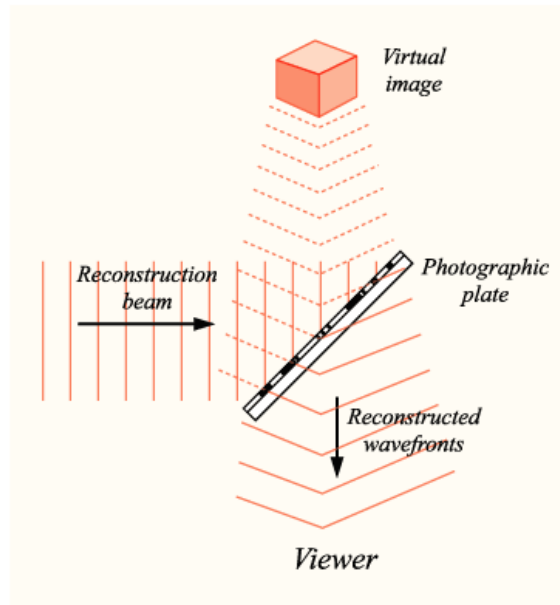
usmjerava na pomoćno zrcalo s jedne strane i na objekt čiji se hologram želi dobiti s druge strane. Snop zraka reflektiran od ogledala naziva se referentni snop, a snop zraka reflektiran od objekta naziva se objektni snop. Referentni i objektni snop su koherentni i međusobnom interakcijom daju interferentnu sliku na fotografskoj ploči. Nakon osvjetljavanja i razvijanja fotografske ploče na njoj se nalaze interferentni uzorak snimanog objekta, tj. skup tamnih i svijetlih pruga koje sadrže informaciju o rasporedu faza svjetlosnih oscilacija u objektnom snopu. [12]



**Slika 10.** Shema snimanja holograma

(<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/34/Holography-record.png>)

Da bi se iz holograma koji se nalazi na fotografskoj ploči rekonstruirala slika potrebno je ponoviti postupak kakav je proveden prilikom snimanja holograma. Shema rekonstrukcije prikazana je na slici 11. Pri rekonstrukciji hologramske slike na mjesto fotoosjetljive ploče postavljen je hologram. Uslijed difrakcije upadnog snopa na hologramu nastaje val koji ima istu strukturu kao val koji je bio reflektiran od objekta čiji hologram se snimao. Pored vala koji daje imaginarnu sliku, difrakcijom na hologramu nastaje i val koji daje realnu sliku predmeta. [12]

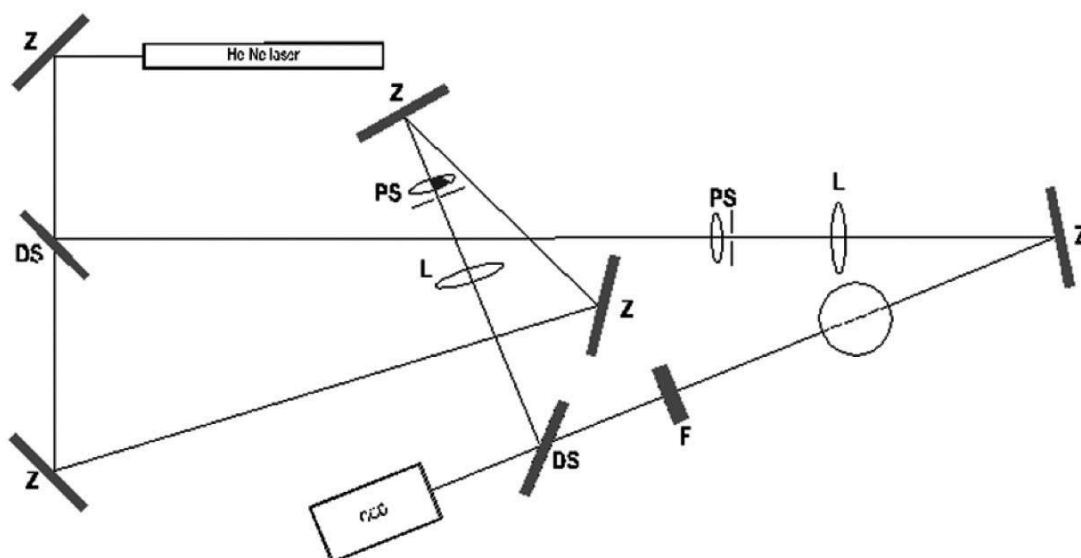


**Slika 11.** Shema rekonstrukcije holograma

(<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/0f/Holography-reconstruct.png>)

#### 6.4. Digitalna hologrfska interferometrija

Digitalna holografaska interferometrija je nedestruktivna metoda promatranja deformacija u realnom vremenu. Naime, ako se set-up za snimanje nekog objekta postavi jednako kao da se snima njegov hologram, ali sa CCD<sup>3</sup> zaslonom umjesto fotografske ploče, CCD zaslon će vrijednosti interferencije dvaju svjetlosnih snopova spremi u obliku digitalne slike, odnosno takozvanog interferograma. Ukoliko se objekt snima kontinuirano i u određenim vremenskim razmacima, moguće je definirati točnu deformaciju objekta u jedinici vremena na temelju dobivenih interferograma. Na slici 12 vidljiv je set-up za snimanje interferograma metodom digitalne holografске interferometrije. [19]



**Slika 12.** Set-up za snimanje interferograma (Knežević A., Demoli N., Tarle Z., Šolc M. (2005). *Digitalna holografska interferometrija – nova metoda mjerenja polimerizacijskoga skupljanja kompozitnih materijala*, Acta Stomat Croat, 145.-153.str)

<sup>3</sup>CCD (eng. Charge Coupled Device) – elektronički uređaj koji na svojoj površini sadrži fotosenzitivne diode koje pretvaraju prikupljene fotone u električni napon. Napon se procesira od strane analogno-digitalnog konvertera koji svakom nivou osvjetljenja dodjeljuje binarnu oznaku kako bi slika mogla biti pohranjena u digitalnom obliku.

## 7. EKSPERIMENTALNI DIO

### 7.1. Cilj istraživanja

Cilj ovog istraživanja je pokušati primjeniti digitalnu holografsku interferometriju u grafičkoj tehnologiji, točnije u samom procesu tiska gdje može ukazati na brzinu promjene dimenzije tiskovne podloge. Na taj način otvara se mogućnost pravovremene korekcije parametara u tisku kako dotična promjena ne bi negativno utjecala na kvalitetu otiska. Poznato je da papir kao tiskovna podloga u prisutstvu vlage povećava svoju dimenziju, a u ofsetnom tisku gdje je nužan njegov kontakt s otopinom za vlaženje ta činjenica često dovodi do poteškoća u procesu tiska. Naime, minimalan pomak jedne separacije u odnosu na drugu, rezultirati će neželjenim pojavama na otisku.

Istraživanje koje se provodi u ovom diplomskom radu nastavak je istraživanja iz diplomskog rada naziva "Interferometrijska analiza dimenzionalne stabilnosti papira" autorice Antonie Dobrote iz 2009. godine. S obzirom da se za potrebe izrade ovog diplomskog rada koriste mjerenja koja je uradila spomenuta kolegica, opis elemenata koji se koriste pri snimanju uzorka, njihove tehničke karakteristike, fotografije i skice preuzete su iz navedenog rada.

Istraživanjem se želi utvrditi dimenzionalna stabilnost za tri vrste papira koje dovodimo u kontakt s tri otopine za vlaženje. Papiri i otopine za vlaženje korišteni u istraživanju nalaze se u tablici 2.

**Tablica 2.** Papiri i otopine za vlaženje korišteni u istraživanju

Papir		Otopina za vlaženje	
1	Fotokopirni papir 80 g/m <sup>2</sup>	1	Destilirana voda
2	Premazani papir 90 g/m <sup>2</sup>	2	Destilirana voda + P-41
3	Premazani papir 200 g/m <sup>2</sup>	3	Destilirana voda + P-43

P-41 je oznaka za Super Pufer, a P-43 za preparirani izopropilni alkohol. Puferi su otopine koje se dodaju otopini za vlaženje u svrhu održavanja konstantnog pH. U protivnom bi zbog kontakta boje, tiskovne podloge i otopine

za vlaženje došlo do neželjenih kemijskih promjena u istima. P-41 načinjeno je od izopropilnog alkohola i koristi se kod ofsetnog tiska na strojevima s klasičnim sistemom vlaženja višerima. U praksi se razrjeđuje vodom u omjeru 1:10. Omogućuje uspostavu ravnoteže između tiskarske boje i otopine za vlaženje u širem rasponu, zatim dobar sklad boja na otisku i bolji kontrast. P-43 je preparirani izopropilni alkohol namijenjen sustavima s alkoholnim vlaženjem i ovisno o uvjetima tiska dodaje ga se do 20%.

Često se još u otopinu za vlaženje dodaju površinski aktivne tvari poput 2-propanol alkohola kako bi smanjili površinsku napetost između otopine za vlaženje i tiskovne forme. Na taj način omogućuje se vlaženje iste površine manjom količinom otopine za vlaženje.

U daljnjem tekstu istraživanja papiri i otopine za vlaženje biti će označavani brojevima koji odgovaraju tablici 2.

## ***7.2 Materijali i metode istraživanja***

S obzirom da se radi o interferometrijskom mjerenju, da bi ono bilo moguće aparatura kojom mjerimo mora biti na takav način fiksirana da ne može doći ni do najmanjih pomaka. Pomak od samo jedna valne duljine ne bi dao interferogram kojim se može postići željeni cilj. Stoga je poželjno da prostorija u kojoj se snima bude u prizemlju ili podrumu zgrade kako bi se prigušile vibracije uzrokovane gradskim prometom, kretanjem u susjednim prostorijama i slično. Također, zgrada u kojoj se snima trebala bi biti smještena što dalje od velikih prometnica i zračnih koridora jer je bitno da vibracije s tla ne dopru do površine optičkog stola za vrijeme osvjetljavanja holograma. Potrebno je i da se prostorija može potpuno zamračiti jer nikakvo svjetlo osim laserskog ne smije padati na zaslon na kojem se snima hologram.

Ukoliko je prostorija klimatizirana zračnim klima uređajem, on se mora isključiti najmanje 30 minuta prije snimanja. Ne smije biti nikakvog strujanja zraka od strane ventilacije jer pomicanje optičkih komponenti za vrijeme eksponiranja uništava snimljeni hologram.



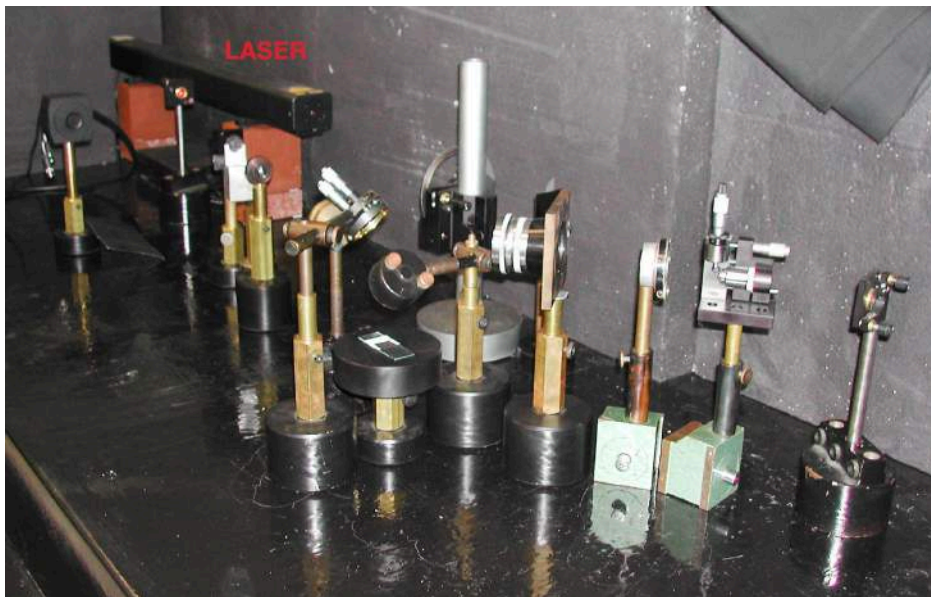
### 7.2.1. Optički stol

U središte prostorije u kojoj se odvija snimanje postavljen je željezni optički stol dimenzija 1400 x 800 x 15 cm. Precizni optički instrumenti ovise o pouzdanoj pozicionoj stabilnosti. Vibracije unutar i oko radnog prostora mogu uzrokovati kretanja optičkih elemenata, koji rezultiraju neželjenim pomacima i vremenski varijabilnim aberacijama pa nastaje nejasni hologram. Optički stol osigurava nepomičnu radnu površinu, gotovo bez ikakvih vibracija i ima ulogu nosača optičkih komponenti sustava za snimanje holograma. On mora biti dizajniran da prigušuje sve vibracije iz okoline.

Ploča optičkog stola načinjena je od mramora. Stol mora imati četiri noge, od kojih svaka mora biti sastavljena od tri betonska bloka širine 20 cm postavljena jedan na drugoga. Njihov položaj u odnosu na mramornu ploču je vrlo bitan da bi se maksimalno eliminirale vibracije s poda. Noga stola mora biti postavljena točno na rub stola, po širini, a centar svake noge po dužini stola treba biti udaljen od ruba stola za 22% od ukupne duljine stola. Ova udaljenost je određena eksperimentalno i omogućuje maksimalno prigušivanje vibracija s poda. Na vrhu betonskog bloka, na svim nogama stola, postavljena je kružno izrezana šperploča promjera 40 cm, debljine 1,875 cm (0,7 inča). Šperploča ima funkciju podloge na koju se postavlja gumena zračnica. Na vrh svake šperploče postavljaju se dvije zračnice. Zračnica mora imati promjer od otprilike 37,5 cm (15 inča) kada je napuhana. Pritisak zraka u zračnici ne može se izmjeriti manometrom jer je prenizak, ali zadovoljavajuć je ukoliko je moguće u nju utisnuti prst oko 2,5 cm. Ako su zračnice previše napuhane doći će do prijenosa niskofrekventnih vibracija do ploče stola. Ako zračnice nisu dovoljno napuhane, do ploče stola će doprijeti niskofrekventne vibracije. Na zračnice se postavlja mramorna ploča na koju se postavljaju optičke komponente. Može se i između zračnica i ploče postaviti stiroporne ploče radi još kvalitetnije prigušivanja vibracija. Dimenzija mramorne ploče mora biti najmanje 90 x 120 cm, debljine najmanje 0,8-1 inch (1 inch = 2,54 cm).

### 7.2.2. Laser

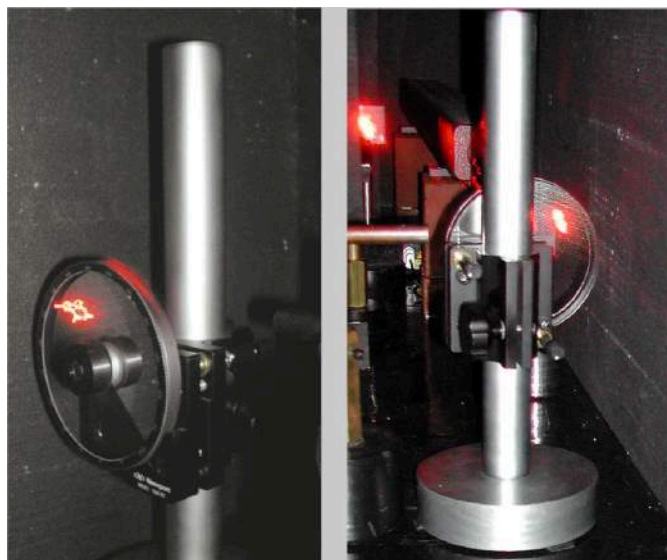
Korišten je He-Ne laser proizvođača Spectra Physics Instruments, model 127 koji emitira svjetlost valne duljine 632,8 nm što spada u područje crvenog dijela spektra. Nominalna izlazna vrijednost snage je 25 mW s time da stvarna izlazna snaga ovisi o vremenu rada lasera s najvećom mogućom vrijednosti od 32 mW. Izlazni snop je linearno polariziran okomito na radnu površinu stola s omjerom gušenja polarizacije 500 : 1. Promjer snopa je  $(1,25 \pm 0,10)$  mm, a divergencija  $(0,66 \pm 0,05)$  mm. Duljina koherencije je 25 cm. Ovaj laser je klase IIIb i spada lasere umjerenih snaga, ali iziskuje opreznost pri rukovanju.



**Slika 13.** Laser i njegov položaj pri snimanju interferograma

### 7.2.3. Djelitelj snopa

U ovom eksperimentu korišten je kružni djelitelj snopa. Ranijim kalibracijskim mjerenjem ustanovljeno je da je najbolji omjer između objektne i referentne zrake 1:1, odnosno da je početna vrijednost djelitelja  $180^\circ$ .

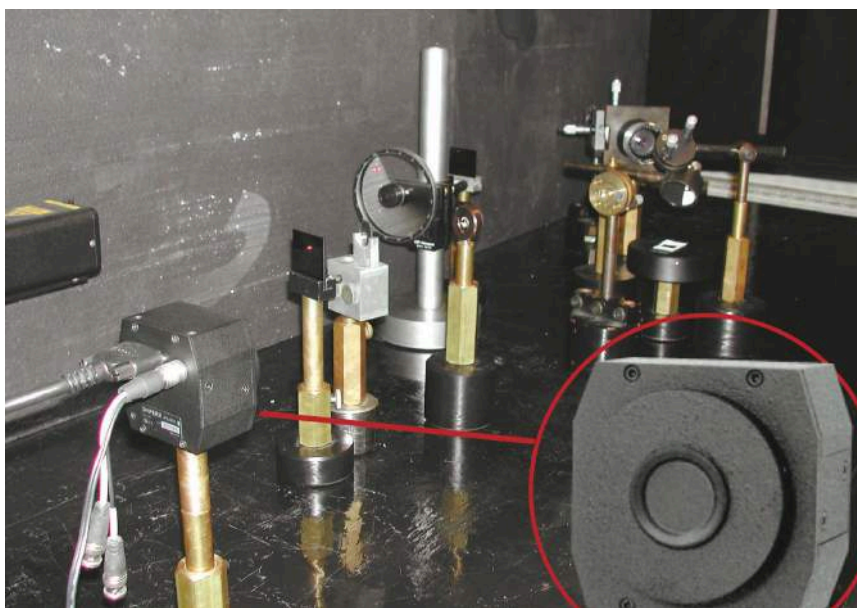


**Slika 14.** *Djelitelj snopa*

#### 7.2.4. CCD kamera

CCD kamera je elektronski uređaj koji služi za pretvaranje svjetlosti u električni signal. Temelji se na fotoosjetljivom CCD (Charge Coupled Device) čipu koji sadrži mnoštvo dvodimenzionalnih silikonskih fotodioda, odnosno piksela. Osnovno obilježje ovog fotodetektora je velika gustoća izvedbe, mala potrošnja i niska razina šuma. Razvoj CCD detektora datira iz 1969. godine. Praktički ne stare pa im je vijek trajanja iznimno dug. Imaju veliko dinamičko područje i povećanu osjetljivost pri slaboj upadnoj svjetlosti. Malih su dimenzija i mase te niske cijene.

Pojava interferencije bilježena je na čip maksimalne razlučivosti 2048 x 2048 piksela. Pikseli su kvadrati veličine 7,4  $\mu\text{m}$ . Model IPX-4M15 ima monokroman zapis s mogućnošću snimanja 15 slika u sekundi. Frekvencija analiziranja linije je 15625 Hz, a frekvencija uzimanja slike 50 Hz. Kamera ima 256 sivih nivoa za snimanje različitih inteziteta slike. Objektiv ima žarišnu daljinu 3,6 mm i automatsko podešavanje blende. Brojni su parametri podesivi na kameri kao što su rezolucija slike, frekvencija uzimanja slika, ekspozicija, prirast i drugi. Međutim, kod kalibracijskog mjerenja uzeti su u obzir samo promjenjivi parametri laserskog snopa, odnosno već navedeni omjer referennog i objektnog snopa te intezitet snopa.



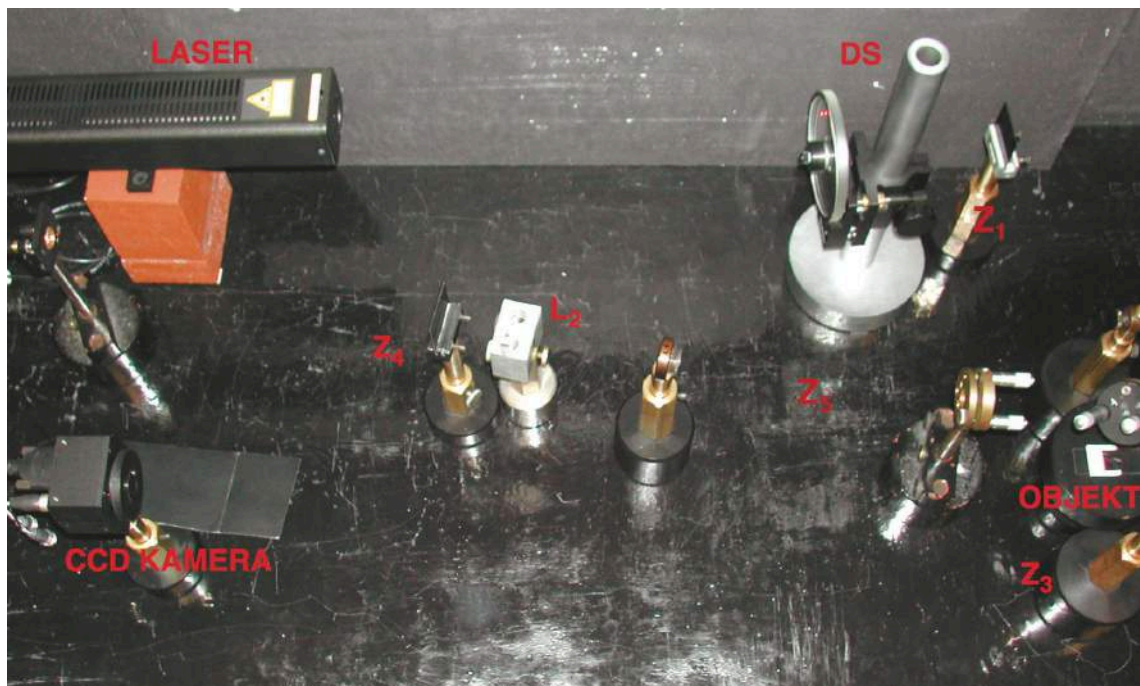
**Slika 15.** CCD kamera

### 7.3. Opis mjerenja

Na optičkom stolu složen je interferometar koji odgovara potrebama mjerenja dimenzionalne stabilnosti uzorkovanog papira. Slika 16 prikazuje fotografiju optičkih komponenti odozgo, a shema na slici 17 definira položaj i nazive pojedinih elemenata interferometra.

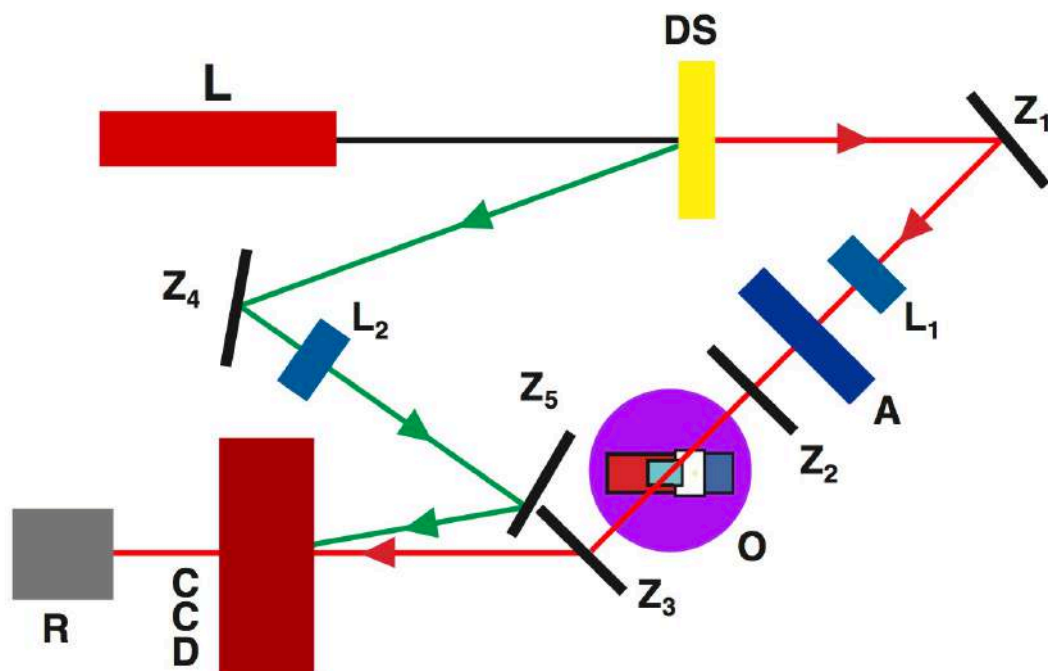
Na shemi je jasno naznačena putanja laserske zrake koja se na djelitelju snopa dijeli na referentnu i objektnu zraku. Objektna zraka putuje do zrcala Z1 koje je podešeno tako da nagovori zraku da padne točno u centar leće L1. Uloga leće je da raširi snop kako bi objekt bio što bolje osvijetljen. Zrcalo Z2 opet zavodi objektnu zraku na drugačiju putanju te ona konačno osvjetljava objekt. Svjetlost reflektirana od objekta dolazi do zrcala Z3 koje dovodi do cilja - objektiva CCD kamere.

Istovremeno, referentna zraka stiže na cilj, putanjom približne duljine, ali s nešto manje prepreka. Ona se odbija od posrebnog dijela djelitelja snopa na zrcalo Z4 koje ju preko divergentne leće L2 šalje do Z5. S tog zrcala zraka putuje u kameru gdje se konačno svjetlosni zapis pretvara u onaj binarni kojeg vidimo na zaslonu računala.



**Slika 15.** Postav elemenata za snimanje holograma



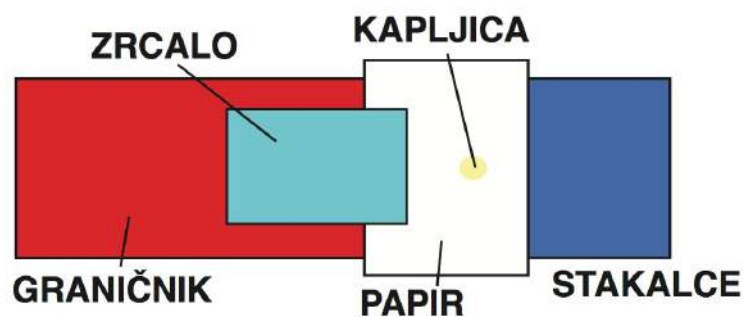


**Slika 17.** Shema mjernja (L-laser, DS-djelitelj snopa, Z-zrcala, L-leće, A-atenuator, O-objekt, CCD-kamera, R-računalo, crvena linija-putanja objektne zrake, zelena linija-putanja referentne zrake)

Objekt čiji je interferentni zapis bilježen kamerom trebao bi biti uzorkovani papir vlažen navedenim otopinama za vlaženje. Papir je položen horizontalno i učvršćen na podlogu. Pomoću zrcala podešenog pod kutom od  $45^\circ$ , objektni snop se usmjerava na papir, a potom se reflektirana svjetlost s površine papira, drugim jednako podešenim zrcalom odbija u kameru. Kapaljkom se odmjerava mala količina pojedinih otopina za vlaženje. Jedna kapljica se ukapava na papir pazeći da se pritom ništa ne dotakne.

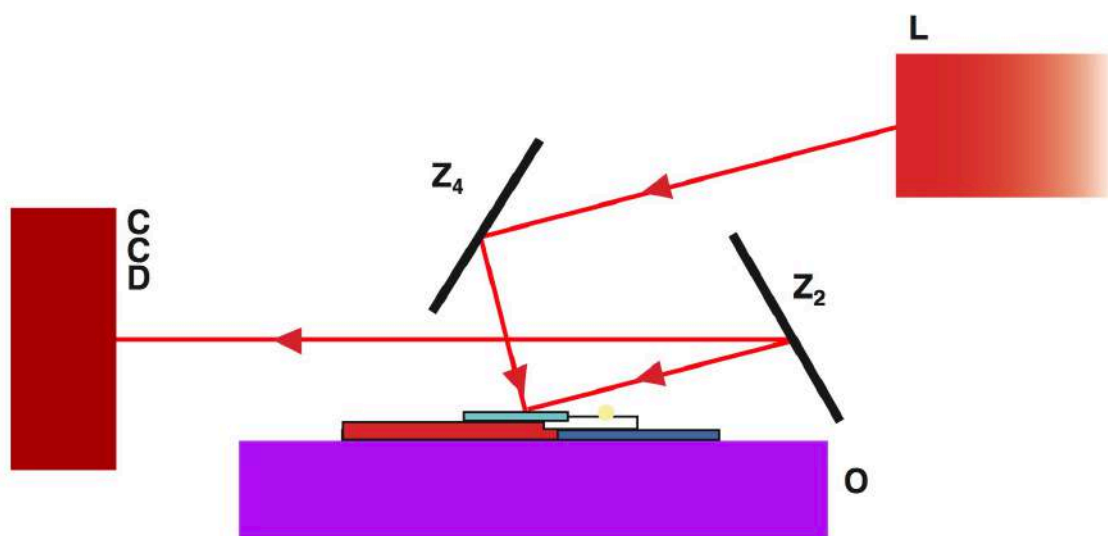
Upotrebjeno je malo zrcalo koje se naslanja na sam rub uzorka papira. Uzorci su jednakih dimenzija  $3 \times 2$  cm i smještaju se na stakalce unutar nalijepljenih graničnika kako bi i papir i zrcalo bili uvijek na istoj poziciji, odnosno zrcalo na rubu papira. Preklapaju se za 5 mm, a kapljica se ukapava 5 mm od ruba papira koji nije pokriven zrcalom. Stakalce se postavlja na podlogu na stolu i podešava tako da snop objektna zraka pada uvijek i samo na zrcalo. Kako na papir djeluje tekućina, zrcalo se pomiče i reflektira snop u smjeru koji

više ne pada u centar objektiva kamere, već ovisi o pomaku zrcala, odnosno o promjeni koja se događa unutar samog uzorka papira.

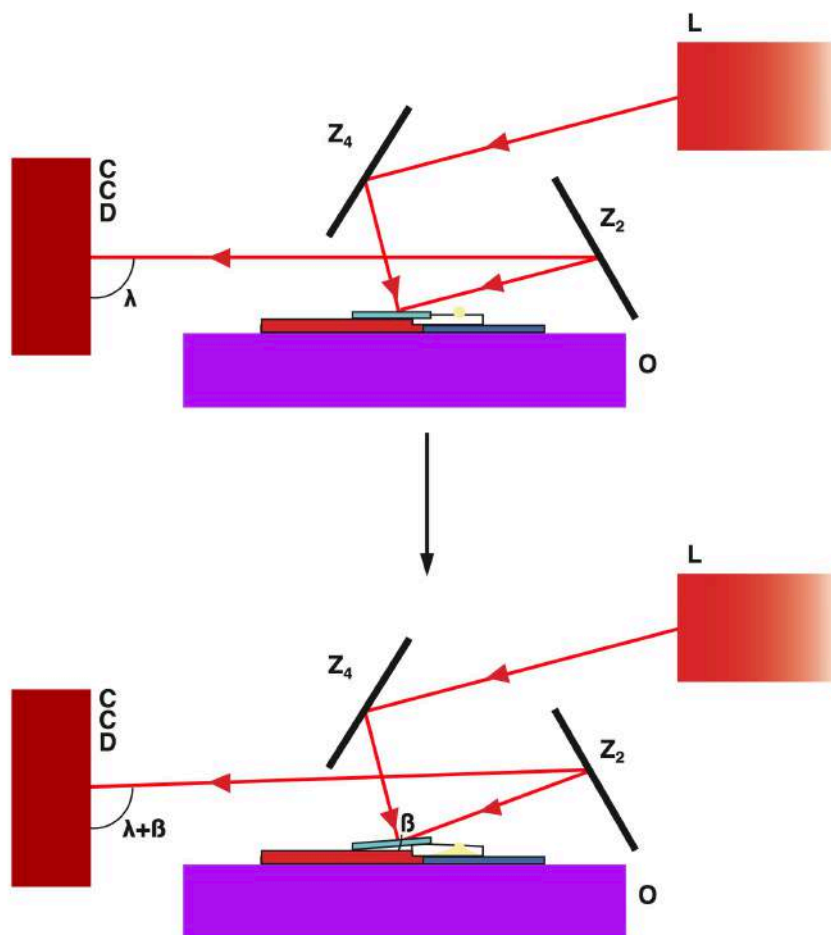


**Slika 18.** Shema metode primjenjene za očitavanje promjena na papiru

Na slici 19 vidljiva je shema dijela mjerenja sa uzorkom smještenim kao na slici 18. Crvena linija označava putanju objektne zrake:



**Slika 19.** Shema reflektiranja objektne zrake



**Slika 20.** Shema promjene kuta upada objektne zrake na CCD kameru do koje dolazi nakon ukapljavanja otopine za vlaženje na promatranu tiskovnu podlogu

Od svake vrste papira uzima se po tri uzorka za svaku pojedinu tekućinu za vlaženje. Svaki uzorak se snima 60 sekundi. Kamera je podešena da snima pet *frame-ova* u sekundi pa se tako u konačnici dobije 300 snimaka za svaki pojedini uzorak.

Dobiveni interferogrami su zapravo hologrami zrcala naslonjenog na uzorak papira. Svaki dio holograma sadrži nevidljivu sliku objekta - zrcala. Rekonstrukcija holograma izvodi se u ImageJ-u, programu u kojem se na svaki pojedini okvir mogu primijeniti Fourierove transformacije. Na taj način dobiva se slika zrcala, odnosno 300 slika zrcala za promatranih 60 sekundi.

Ukoliko se od bilo kojeg, nasumce odabranog holograma istog uzorka, oduzme prvi dobiveni holoogram, za kojeg se može reći da je nastao u



vremenu  $t_0$ , dobije se interferogram čija rekonstrukcija opisuje promjenu koja se događa pri ukapljavanju tekućine na papir. Slika 19 prikazuje interferograme koji se dobiju kada se od holograma u vremenu  $t_1$  oduzme onaj nastao u vremenu  $t_0$ , te kada se od holograma u vremenu  $t_{15}$  oduzme hologram  $t_0$  (lijevo). Na desnoj strani se nalaze njihove rekonstrukcije na kojima se jasno vidi osvijetljena površina zrcala s interferencijskim prugama. Svaki prikaz zrcala sastoji se od jasno definiranih svijetlih i tamnih pruga. Svijetle pruge nastaju kada su referentna i objektna zraka u fazi, a tamne kada se susreću brijeg i dol spomenutih zraka.

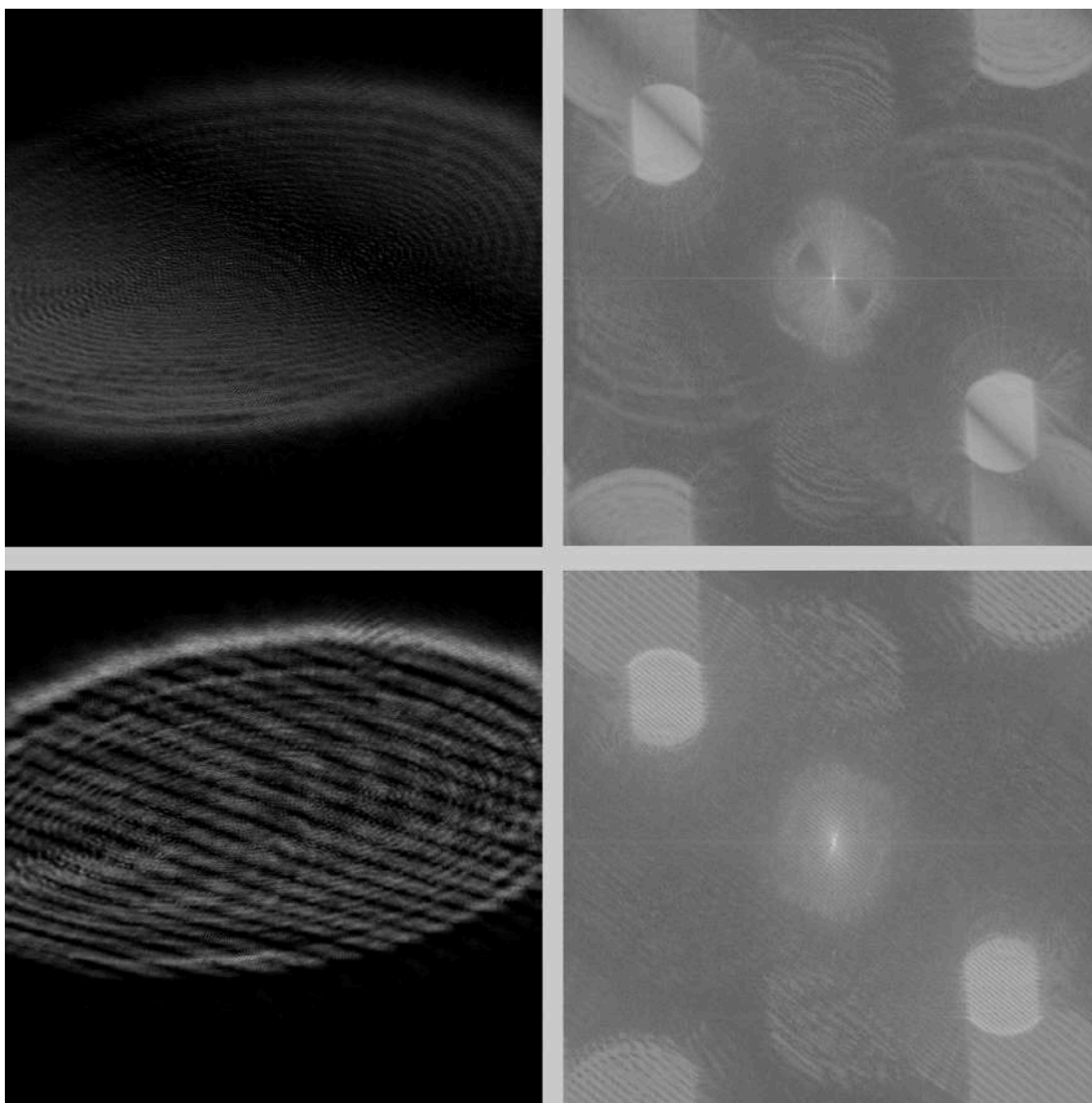
Detaljnou analizom svih uzoraka snimljenih u ovom eksperimentu utvrđeno je da je broj pruga proporcionalan veličini nastale promjene. To znači da za svaki uzorak, broj interferencijskih pruga koje se dobiju navedenim postupcima, na zrcalu raste kako vrijeme odmiče unutar promatranih 60 sekundi. Što je veći redni broj zapisa, interferencijski uzorak je gušći.

Prilikom obrade podataka, uzeto je petnaest referentnih točaka kako bi se pojednostavnila analiza i skratilo vrijeme rada. Tako je za svaki pojedini uzorak uzet svaki dvadeseti snimak, odnosno interferogram koji nastaje svake četvrte sekunde:

**Tablica 3:** Referentne točke za mjerenje sa pripadajućim vremenom u sekundama

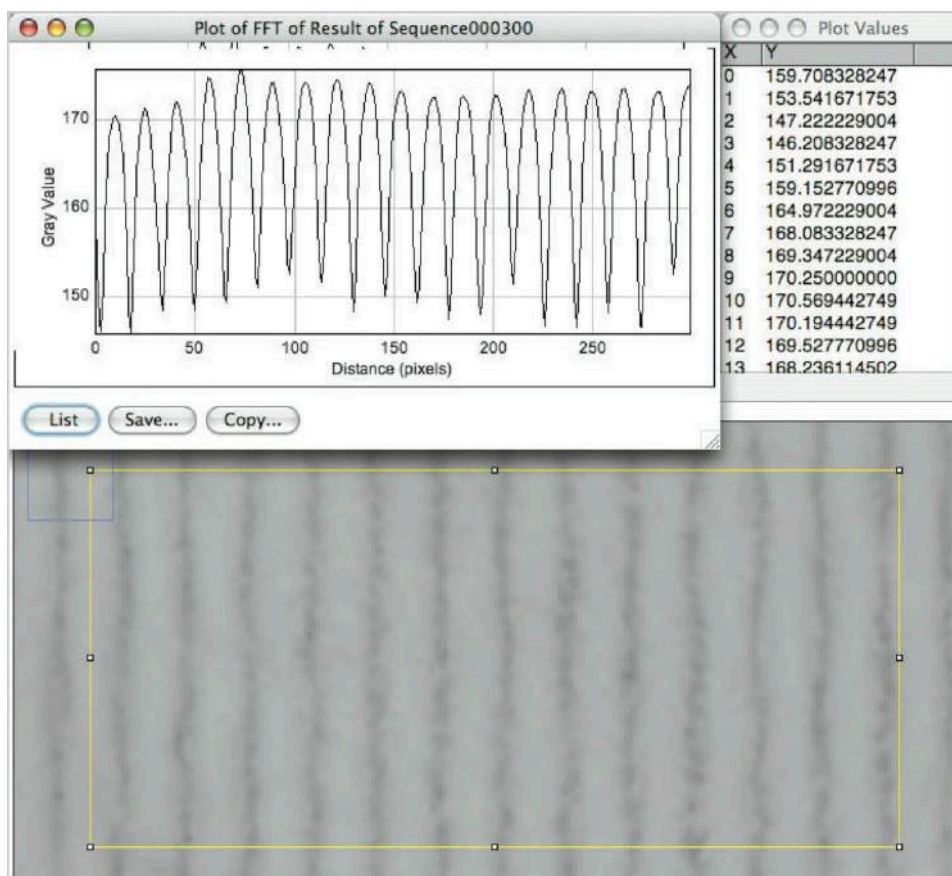
Ref. točka	t (s)	Ref. točka	t (s)	Ref. točka	t (s)
$t_1$	4	$t_6$	24	$t_{11}$	44
$t_2$	8	$t_7$	28	$t_{12}$	48
$t_3$	12	$t_8$	32	$t_{13}$	52
$t_4$	16	$t_9$	36	$t_{14}$	56
$t_5$	20	$t_{10}$	40	$t_{15}$	60

Udaljenost između pruga na pojedinom interferogramu je jednaka. Upravo ta vrijednost korištena je kao varijabilni opisni parametar promjene dimenzionalne stabilnosti papira.



**Slika 21.** Snimke zrcala uzorka fotokopirnog papira vlaženog vodom (lijevo su hologrami zrcala u vremenima  $t_1$  i  $t_{15}$ , a desno njihove rekonstrukcije)

Snimke dobivenih holograma analiziraju se uz pomoć ImageJ softvera za slikovnu analizu. Iz rekonstrukcije svakod pojedinog holograma moguće je kreirati dijagram gustoće zacrnjenja na onom dijelu zrcala na koji se kapala kapljica otopine za vlaženje i na taj način prebrojiti interferentne pruge i odrediti razmak među njima.



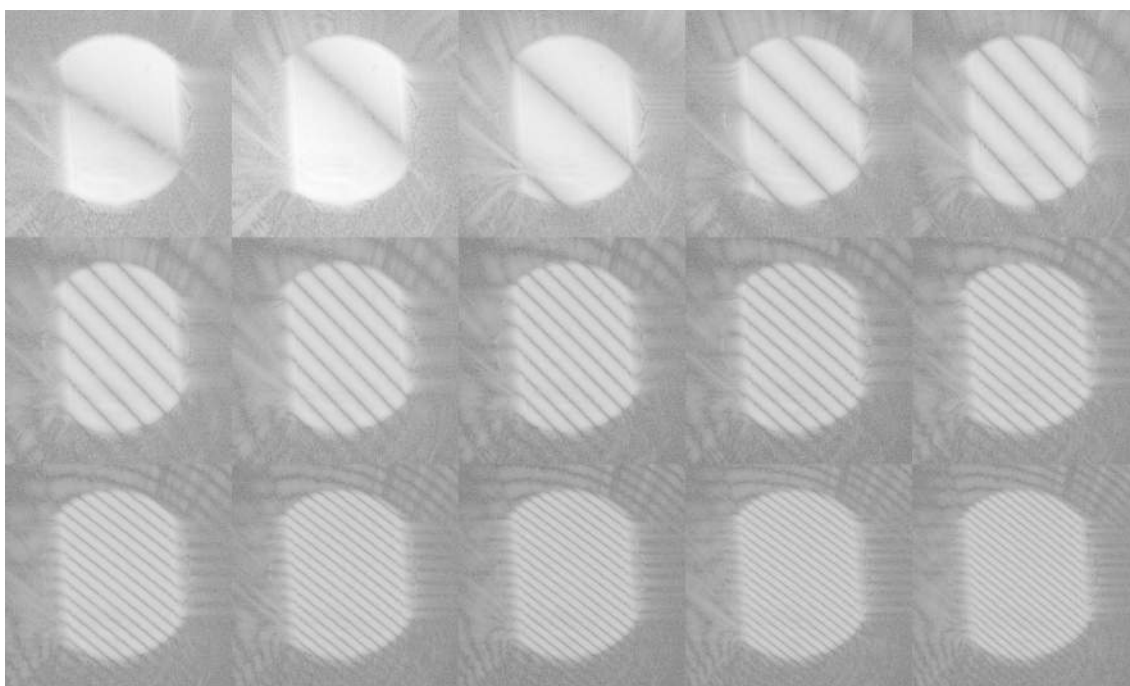
**Slika 22.** Prikaz dobivanja grafa gustoće zacrtnjenja u ImageJ softveru

Na x osi dijagrama nalaze se udaljenosti između točaka izražene u pikselima, a na y osi vrijednosti gustoće zacrtnjenja, odnosno razine sive od 0 do 255. Iz tih podataka, lako je izračunati udaljenost između dva maksimuma ili minimuma na dijagramu. Maksimum predstavlja maksimalnu gustoću zacrtnjenja, odnosno tamnu prugu. Sukladno tome, svijetle pruge su opisane minimumima, odnosno najnižim vrijednostima razine sive u dijagramu.

Udaljenost među prugama je obrnuto proporcionalna broju pruga, pa tako i veličini promjene dimenzionalne stabilnosti uzorka papira. Što je veća promjena, broj interferentnih pruga na zrcalu je veći, manja je udaljenost među njima. Analogno, manja promjena, manji broj pruga, veća udaljenost među njima. Dakle, udaljenost među interferencijskim prugama je parametar koji opisuje promjenu dimenzionalne stabilnosti promatranog uzorka papira.

## 8. REZULTATI I RASPRAVA

Rezultati mjerenja prikazani su u tablicama 4-12, a daju informaciju o udaljenostima između dviju interferentnih pruga na mjerenim uzorcima i to za svaku pojedinu referentnu točku; petnaest referentnih točaka za tri različita papira i tri različite otopine za vlaženje. Na slici 23 vidljiv je primjer rekonstruiranih holograma stakalca koje je naslonjeno na tiskovnu podlogu i ovisno o njenom bubrenju u području kontakta s otopinom za vlaženje tvori drukčiju interferentnu sliku na CCD kameri. Manji broj interferentnih pruga i veća udaljenost među njima znak su malog pomaka kuta koji staklace zatvara s tiskovnom podlogom.



**Slika 23.** *Primjer rekonstrukcije holograma zrcala za 15 referentnih točaka mjerenih na tiskovnoj podlozi 1*

**Tablica 4.** Udaljenosti između interferentnih pruga za papir 1 vlažen otopinom za vlaženje 1

Ref točka	t	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3
t <sub>1</sub>	60	7	12	7
t <sub>2</sub>	56	10	12	6
t <sub>3</sub>	52	16	13	7
t <sub>4</sub>	48	17	12	9
t <sub>5</sub>	44	19	14	11
t <sub>6</sub>	40	20	13	11
t <sub>7</sub>	36	25	13	10
t <sub>8</sub>	32	30	14	17
t <sub>9</sub>	28	32	14	10
t <sub>10</sub>	24	33	14	10
t <sub>11</sub>	20	42	15	10
t <sub>12</sub>	16	50	16	12
t <sub>13</sub>	12	66	19	14
t <sub>14</sub>	8	90	28	20
t <sub>15</sub>	4	163	57	77

**Tablica 5.** Udaljenosti između interferentnih pruga za papir 1 vlažen otopinom za vlaženje 2

Ref točka	t	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3
t <sub>1</sub>	60	4	5	3
t <sub>2</sub>	56	4	10	3
t <sub>3</sub>	52	6	19	4
t <sub>4</sub>	48	9	73	5
t <sub>5</sub>	44	7	15	5
t <sub>6</sub>	40	8	8	6
t <sub>7</sub>	36	8	7	7
t <sub>8</sub>	32	14	5	8
t <sub>9</sub>	28	16	4	6
t <sub>10</sub>	24	15	9	6
t <sub>11</sub>	20	14	21	6
t <sub>12</sub>	16	19	41	6
t <sub>13</sub>	12	30	95	10
t <sub>14</sub>	8	51	102	11
t <sub>15</sub>	4	58	114	13

**Tablica 6.** Udaljenosti između interferentnih pruga za papir 1 vlažen otopinom za vlaženje 3

Ref točka	t	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3
t <sub>1</sub>	60	5	5	5
t <sub>2</sub>	56	5	5	6
t <sub>3</sub>	52	4	6	5
t <sub>4</sub>	48	5	6	8
t <sub>5</sub>	44	4	6	12
t <sub>6</sub>	40	4	7	16
t <sub>7</sub>	36	5	7	17
t <sub>8</sub>	32	4	7	13
t <sub>9</sub>	28	5	8	14
t <sub>10</sub>	24	5	8	16
t <sub>11</sub>	20	6	11	20
t <sub>12</sub>	16	9	13	21
t <sub>13</sub>	12	11	15	26
t <sub>14</sub>	8	21	18	41
t <sub>15</sub>	4	45	36	43

**Tablica 7.** Udaljenosti između interferentnih pruga za papir 2 vlažen otopinom za vlaženje 1

Ref točka	t	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3
t <sub>1</sub>	60	14	17	74
t <sub>2</sub>	56	17	19	67
t <sub>3</sub>	52	17	18	70
t <sub>4</sub>	48	18	18	80
t <sub>5</sub>	44	21	19	101
t <sub>6</sub>	40	27	20	200
t <sub>7</sub>	36	54	23	163
t <sub>8</sub>	32	160	22	142
t <sub>9</sub>	28	173	22	105
t <sub>10</sub>	24	200	28	121
t <sub>11</sub>	20	133	36	90
t <sub>12</sub>	16	126	82	84
t <sub>13</sub>	12	141	77	86
t <sub>14</sub>	8	186	106	112
t <sub>15</sub>	4	194	161	142



**Tablica 8.** Udaljenosti između interferentnih pruga za papir 2 vlažen otopinom za vlaženje 2

Ref točka	t	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3
t <sub>1</sub>	60	36	4	8
t <sub>2</sub>	56	38	5	6
t <sub>3</sub>	52	40	4	8
t <sub>4</sub>	48	43	4	7
t <sub>5</sub>	44	48	4	7
t <sub>6</sub>	40	48	5	7
t <sub>7</sub>	36	54	3	12
t <sub>8</sub>	32	57	3	14
t <sub>9</sub>	28	63	4	38
t <sub>10</sub>	24	71	5	63
t <sub>11</sub>	20	92	6	65
t <sub>12</sub>	16	101	7	74
t <sub>13</sub>	12	136	38	91
t <sub>14</sub>	8	195	130	105
t <sub>15</sub>	4	196	148	114

**Tablica 9.** Udaljenosti između interferentnih pruga za papir 2 vlažen otopinom za vlaženje 3

Ref točka	t	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3
t <sub>1</sub>	60	4	5	6
t <sub>2</sub>	56	4	5	6
t <sub>3</sub>	52	4	5	6
t <sub>4</sub>	48	5	4	5
t <sub>5</sub>	44	5	5	5
t <sub>6</sub>	40	5	5	5
t <sub>7</sub>	36	4	9	6
t <sub>8</sub>	32	5	10	7
t <sub>9</sub>	28	8	16	8
t <sub>10</sub>	24	11	14	15
t <sub>11</sub>	20	12	16	23
t <sub>12</sub>	16	12	15	32
t <sub>13</sub>	12	17	27	57
t <sub>14</sub>	8	16	58	87
t <sub>15</sub>	4	165	112	105

**Tablica 10.** Udaljenosti između interferentnih pruga za papir 3 vlažen otopinom za vlaženje 1

Ref točka	t	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3
t <sub>1</sub>	60	9	5	8
t <sub>2</sub>	56	7	5	8
t <sub>3</sub>	52	5	6	7
t <sub>4</sub>	48	5	15	8
t <sub>5</sub>	44	5	16	19
t <sub>6</sub>	40	5	15	34
t <sub>7</sub>	36	4	18	26
t <sub>8</sub>	32	7	28	21
t <sub>9</sub>	28	6	25	23
t <sub>10</sub>	24	23	26	20
t <sub>11</sub>	20	36	30	57
t <sub>12</sub>	16	39	35	47
t <sub>13</sub>	12	37	44	72
t <sub>14</sub>	8	43	62	119
t <sub>15</sub>	4	80	116	112

**Tablica 11.** Udaljenosti između interferentnih pruga za papir 3 vlažen otopinom za vlaženje 2

Ref točka	t	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3
t <sub>1</sub>	60	7	8	8
t <sub>2</sub>	56	9	8	9
t <sub>3</sub>	52	8	8	6
t <sub>4</sub>	48	11	10	8
t <sub>5</sub>	44	16	10	8
t <sub>6</sub>	40	14	12	8
t <sub>7</sub>	36	14	10	9
t <sub>8</sub>	32	16	10	10
t <sub>9</sub>	28	16	7	12
t <sub>10</sub>	24	20	6	12
t <sub>11</sub>	20	17	8	14
t <sub>12</sub>	16	16	10	12
t <sub>13</sub>	12	16	10	5
t <sub>14</sub>	8	21	14	9
t <sub>15</sub>	4	42	27	21

**Tablica 12.** Udaljenosti između interferentnih pruga za papir 3 vlažen otopinom za vlaženje 3

Ref točka	t	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3
t <sub>1</sub>	60	2	2	4
t <sub>2</sub>	56	3	3	4
t <sub>3</sub>	52	2	2	7
t <sub>4</sub>	48	2	2	5
t <sub>5</sub>	44	3	3	5
t <sub>6</sub>	40	5	3	6
t <sub>7</sub>	36	5	3	9
t <sub>8</sub>	32	4	3	9
t <sub>9</sub>	28	5	3	11
t <sub>10</sub>	24	8	2	12
t <sub>11</sub>	20	4	2	9
t <sub>12</sub>	16	4	3	13
t <sub>13</sub>	12	6	6	14
t <sub>14</sub>	8	9	5	24
t <sub>15</sub>	4	12	10	31

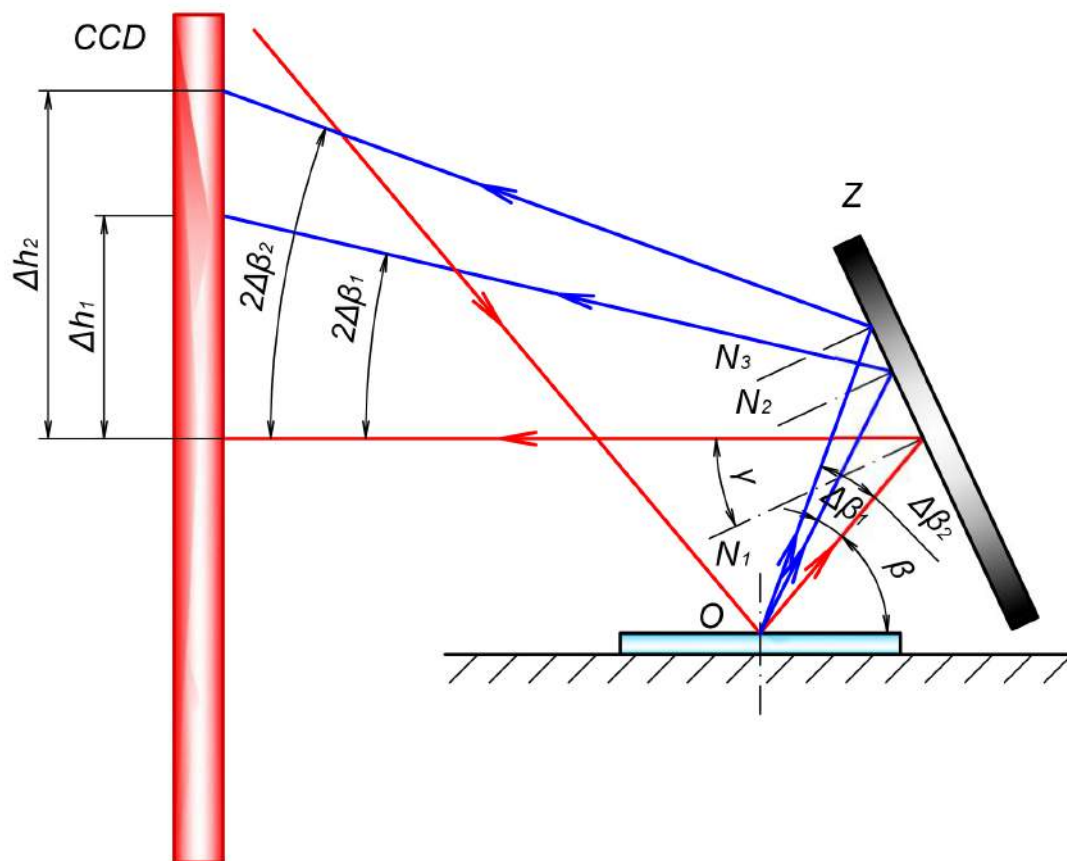
Broj pruga snimljenog uzorka je proporcionalan veličini nastale promjene. To znači da za svaki uzorak, broj interferencijskih pruga dobivenih eksperimentom, na zrcalu raste kako vrijeme odmiče u vremenskom intervalu od 60 sekundi. Analogno tome, što je udaljenost među prugama manja, veći je broj pruga na interferogramu uzorka, promjena je veća. Što je udaljenost među prugama veća, manje je pruga na interferogramu uzorka, promjena je manja.

80-gramski papir vlažen vodom najmanje je podložan promjeni, što je i očekivano. Tanji papir može upiti manje tekućine i proces upijanja je kratkotrajniji. Slična situacija je i sa ostalim sredstvima za vlaženje primjenjenih na 80-gramski papir.

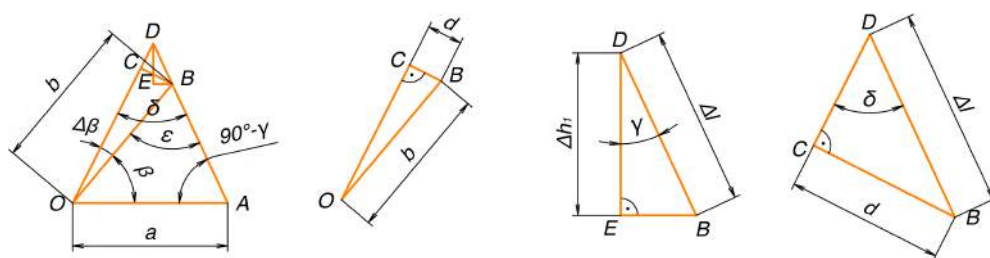
Iako bi se moglo očekivati da je stabilniji 90-gramski papir od 200-gramskog, eksperiment pokazuje da to nije tako. Vrijednosti udaljenosti među prugama generalno su veće kod 200-gramskog papira iako je promjena u početku burnija.

### ***8.1. Matematički model za izračunavanje promjene dimenzije papira na temelju navedenog istraživanja***

Prije nego papir dođe u kontakt s otopinom za vlaženje, zrcalo koje se na njemu nalazi odbija objektnu zraku pod nekim kutem  $\beta$  kao što je vidljivo na slici 24. Kada se na papir nakapa otopina za vlaženje, on bubri i pomiče zrcalo koje u tom slučaju više ne reflektira kut  $\beta$  već neki  $\beta + \Delta\beta$ . Pomak u kutu od  $\Delta\beta$  uzrokuje pomak na CCD monitoru od  $2\Delta\beta$ , odnosno za udaljenost  $\Delta h$ . Da bi iz ovih parametara mogli izračunati kolika se promjena u dimenziji papira dogodila, skica pomaka kuta  $\beta$  raščlanjena je na nekoliko trokuta (slika 25).



**Slika 24.** Skica pomaka interferentnih pruga u odnosu na kut  $\beta$



**Slika 25.** Raščlamba skice na slici 24 na trokute

Iz trokuta OAD dobivamo:

$$(\beta + \Delta\beta) + (90^\circ - \gamma) + \delta = 180^\circ \quad (14)$$

$$\delta = 90^\circ + \gamma - (\beta + \Delta\beta) \quad (15)$$

Iz trokuta OAB dobivamo:

$$\beta + \varepsilon + (90^\circ - \gamma) = 180^\circ \quad (16)$$

$$\varepsilon = 90^\circ + \gamma - \beta \quad (17)$$

Iz sinusovog poučka iz trokuta OAB dobivamo slijedeće:

$$\frac{a}{\sin \varepsilon} = \frac{b}{\sin(90^\circ - \alpha)} = \frac{b}{\cos \alpha} \quad (18)$$

$$b = a \frac{\cos \alpha}{\sin \varepsilon} \quad (19)$$

Iz trokuta OBC dobivamo:

$$b \sin \Delta\beta = d \quad (20)$$

Iz trokuta BCD dobivamo:

$$\Delta l = \frac{d}{\sin \delta} \quad (21)$$

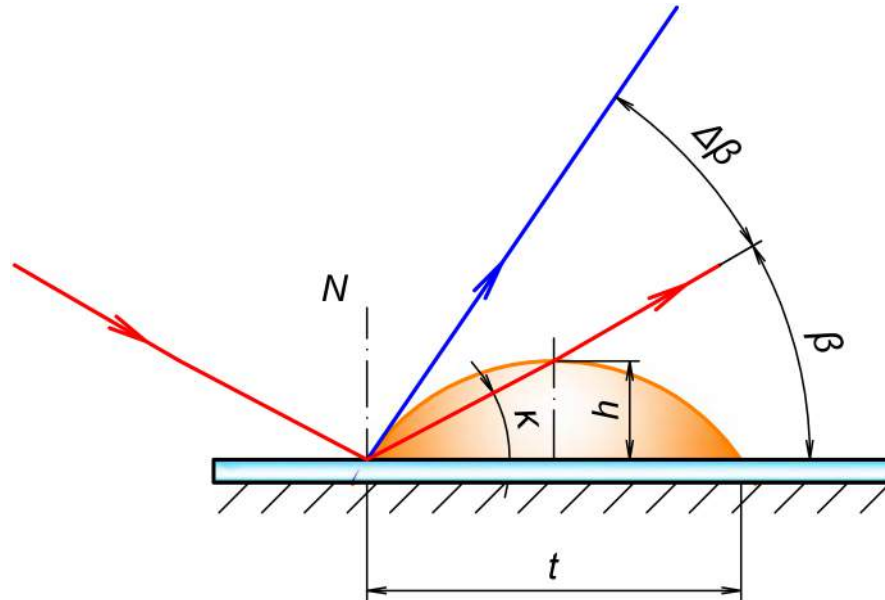
Iz trokuta BDE dobivamo:

$$\Delta h_1 = \Delta l \cos \gamma \quad (22)$$



Iz trokuta DGF dobivamo:

$$\Delta h = c \tan(2\Delta\beta) \quad (23)$$



**Slika 26.** Shema utjecaja kapljice otopine za vlaženje na promjenu dimenzije papira

Na slici 26 nalazi se shema koja prikazuje papir kojem se mjeri dimenzionalna stabilnost. Kut  $\Delta\beta$  možemo aproksimirati s kutem  $\beta$  kako bi lakše mogli izračunati dimenzionalnu promjenu. Oblik koji papir poprima na dijelu na kojem je došlo do njegovog kontakta s otopinom za vlaženje možemo aproksimirati s kružnim odsječkom, a promjenu u dimenziji možemo izračunati kao razliku duljine kružnog luka i veličine  $t$  nad kojim je kružni luk nastao. Slijedeće jednadžbe prikazuju kako se teoretski iz udaljenosti između interferentnih pruga dobivenih iz interferograma može izračunati dimenzionalna promjena papirne tiskovne podloge.

$$\Delta\beta \approx \beta \quad (24)$$

$$\tan \beta = \frac{h}{\frac{t}{2}} = \frac{2h}{t} \quad (25)$$

$$h = \frac{t \tan \beta}{2} \quad (26)$$

$$t = 2\sqrt{2hr - h^2} \quad (27)$$

$$r = \frac{t^2 + 4h^2}{8h} \quad (28)$$

$$l = \frac{r\pi\beta}{360^\circ} \quad (29)$$

Iz prethodnih relacija zaključujemo kako je dimenzionalna promjena razlika između veličina  $l$  i  $t$ .

## 9. ZAKLJUČAK

Svaka vrsta papira ima svoju specifičnu dimenzionalnu stabilnost. S obzirom da se u tisku upotrebljava velik broj različitih papira, teško je standardizirati proces samo na temelju podešavanja opsega cilindara. Potrebno je poznavati, i unaprijed u pripremnu fazu tiska implementirati, informacije o promjenama koje će se u tiskarskom stroju dogoditi za vrijeme tiska. Problem dimenzionalne stabilnosti papira najviše se očituje kod višebojnog ofsetnog tiska. Naime, kada tiskovna podloga dolazi u kontakt s tiskovnom formom na kojoj se, osim boje, nalazi otopina za vlaženje, doći će do apsorpcije dijela tekućine u strukturu papira. Vlakna u papiru će nabubriti i cjelokupna površina papira promijeniti će svoje dimenzije. Ukoliko je nakon otiskivanja te boje potrebno otisnuti još koju, ovisno o veličini promjene, doći će do pomaka i krivog naližeganja jedne boje na drugu. Taj pomak u paseru rezultirati će otisak neželjene kvalitete.

Holografska interferometrija u ovoj se priči nameće kao idealno rješenje za mjerenje tih najmanjih promjena koje se događaju na tiskovnoj podlozi bez da se mjereni uzorak uništi. Ova metoda zamjećuje promjene na nekom objektu u realnom vremenu, te je na taj način moguće proizvodni proces tiska držati pod kontrolom.

Kada za svaku pojedinu tiskovnu podlogu znamo kako se ona ponaša u kontaktu s vlagom, moći ćemo to znanje unaprijed ukalkulirati u pripremnoj fazi kako u fazi tiska ne bi došlo do neželjenih posljedica.

## Literatura

1. Golubović A. (1984). *Tehnologija izrade i svojstva papira*, Viša grafička škola, Zagreb
2. Golubović A. (1993). *Svojstva i ispitivanje papira*, Grafički fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb
3. Gojo M. (1999). *Ispitivanje fizikalno-kemijskih svojstava otopina za vlaženje*, Acta Graphica, 11., 2., 63-72.str.
4. Bolanča S. (1997). *Glavne tehnike tiska*, Acta Graphica, Zagreb
5. Zjakić I. (2007). *Upravljanje kvalitetom ofsetnog tiska*, Hrvatska sveučilišna naklada, Zagreb
6. Cigula T., Mahović Poljaček S., Gojo M., Funkcija dodataka otopine za vlaženje, Zbornik radova sa Znanstveno stručnog skupa Tiskarstvo 07, Žiljak, Vilko (Ur.), 11-11, Zagreb, 2007., FotoSoft, Zagreb
7. Henč-Bartolić V., Kulišić P. (2004). *Valovi i optika*, Školska knjiga, Zagreb
8. \*\*\* [http://www.phy.pmf.unizg.hr/fizgeo/tonejc/fizikalna\\_optika.pdf](http://www.phy.pmf.unizg.hr/fizgeo/tonejc/fizikalna_optika.pdf) - Prirodoslovno matematički fakultet, Odsjek za fiziku, 12.8.2014.
9. Hariharan P. (2007). *Basics of Interferometry*, Academic Press, USA
10. Marić M. (2008). *Fizika s laserskim pointerima, Michelsonov i Mach Zehnderov interferometar*, diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet, Fizički odsjek
11. \*\*\*<http://www.rp-photonics.com/interferometers.html>, *RP Photonics Encyclopedia, Interferometers*, 12.8.2014.
12. \*\*\* <http://holography.ru/histeng.htm>, *Holography*, 12.8.2014.
13. \*\*\* <http://www.bgu.ac.il/~glevi/website/Guides/Lasers.pdf>, *The Levi Gheber Lab*, 13.8.2014.
14. \*\*\*<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/mod5.html>, *Stimulated Emission*, 13.8.2014.
15. \*\*\*<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/mod5.html>, *Hyperphysics*, 13.8.2014.

16. \*\*\*<http://www.britannica.com/EBchecked/topic/330874/laser/256339/Laser-beam-characteristics>, *Encyclopedia Britannica, Laser beam characteristics*, 14.8.2014.
17. \*\*\*[http://www.rp-photonics.com/beam\\_splitters.html?s=ak](http://www.rp-photonics.com/beam_splitters.html?s=ak), *RP Photonics Encyclopedia, Beam splitters*, 12.8.2014.
18. Dobrota A. (2009). *Interferometrijska analiza dimenzionalne stabilnosti papira*, diplomski rad, Grafički fakultet Zagreb
19. Knežević A., Demoli N., Tarle Z., Šolc M. (2005). *Digitalna holografska interferometrija – nova metoda mjerenja polimerizacijskoga skupljanja kompozitnih materijala*, Acta Stomat Croat, 145.-153.str